



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ECV

ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE DE MÁQUINAS TUNELADORAS EM ROCHAS DURAS

Acadêmico: Isabela de Paulo
Matrícula: 08236020

Florianópolis, Julho de 2014.

ISABELA DE PAULO

**ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE DE MÁQUINAS
TUNELADORAS EM ROCHAS DURAS**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Departamento
de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina como
parte dos requisitos para a obtenção
do título de Engenheira Civil.

Área: Construção de Túneis
Orientador: Marcos Aurélio Noronha, Dr.

Florianópolis, Julho de 2014.

ISABELA DE PAULO

**ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE DE MÁQUINAS
TUNELADORAS EM ROCHAS DURAS**

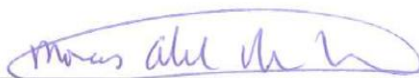
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como requisito
parcial para obtenção do título de

ENGENHEIRA CIVIL



Prof. Lia Caetano Bastos - Coordenadora de TCC

Banca Examinadora:



Prof. Marcos Aurélio Noronha, Dr - Orientador

Prof. Luciana Rohdes

Eng. Lidiani Pierri

Eng. Rafael Pacheco

AGRADECIMENTOS

É com muita sinceridade que agradeço a todas as pessoas e instituições, que direta ou indiretamente, tornaram este trabalho possível.

Aos meus pais, por sempre terem incentivado meus estudos e ensinado a importância da educação e, a toda a família, pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao meu namorado, Leonardo Mazzaferro, pelo apoio e companheirismo durante os cinco anos de faculdade que compartilhamos, por sempre ter acreditado no meu potencial e incentivado meu crescimento, e pela imensa ajuda prestada na realização deste trabalho.

Ao Professor Marciano Maccarini, que despertou meu interesse pelo campo da geotecnia, pela amizade e disposição com a qual sempre me recebeu.

Aos engenheiros Lidiani Pierri e Rafael Pacheco pela disponibilidade e pela ajuda prestada que foi de fundamental importância no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Marcos Noronha, pela ajuda prestada e conhecimento compartilhado.

Ao Professor Amund Bruland, por ter cedido sua tese de doutorado a qual serviu de base para este trabalho.

Aos amigos, Narayana Massoco, Carolina Iris, Leonardo Mazzaferro, Gabriel de Abreu Burgos Gonçalves e Marcelo Salles Olinger, pelas incontáveis horas de estudo e de diversão nestes anos cursando Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Catarina.

A todos que, de algum modo, me incentivaram ou colaboraram com este trabalho.

Sumário

Lista de Figuras.....	11
Lista de Tabelas.....	15
Resumo.....	16
1. Introdução	21
1.1. Apresentação do problema e justificativa.....	21
1.2. Objetivos	23
1.2.1. Objetivo geral.....	23
1.2.2. Objetivos específicos	23
1.3. Estrutura do trabalho.....	24
2. Aspectos teóricos relevantes.....	25
2.1. TBM com princípio de corte tradicional	28
2.2. TBM com princípio de corte inovador.....	37
2.2.1. Hidrodemolição como princípio de escavação.....	44
2.3. Método NTNU	49
2.3.1. Parâmetros geotécnicos relevantes ao estudo	50
2.3.1.1. Fragilidade da rocha determinada pelo teste de fragmentação (<i>Drop Test</i>) (S_{20}).....	51
2.3.1.2. Dureza da superfície da rocha determinada pelo teste de perfuração (<i>Sievers' Test</i>) (SJ).....	52
2.3.1.3. Abrasão da rocha determinado pelos testes de abrasão (AV) e abrasão do disco de corte de aço (AVS).....	53
2.3.1.4. Índice de abrasividade CERCHAR (<i>Cerchar Abrasiveness Index – CAI</i>)	54
2.3.2. Cálculo previsional.....	55
2.3.2.1. Taxa de penetração	55
2.3.2.2. Durabilidade dos discos de corte	56
2.3.2.3. Taxa de avanço	58

2.3.2.4. Custos de escavação.....	59
3. Resultados e análises	61
3.1. Dados geológicos e geomecânicos utilizados.....	61
3.2. Cálculo previsional	65
3.2.1. Definição dos parâmetros das tuneladoras.....	65
3.2.2. Taxa de penetração	68
3.2.3. Durabilidade dos sistemas de corte	77
3.2.4. Cálculo da taxa de avanço.....	85
3.2.5. Custos de escavação.....	87
4. Conclusões.....	89
4.1 Limitações	90
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	90
Referências	91

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comparação entre os custos do método mecanizado e do tradicional.	22
Figura 2.1 – Primeira TBM moderna construída pela empresa Robbins em 1952.	25
Figura 2.2 - Inauguração do túnel com a presença do Imperador e comitiva, Estação de Ferro Rio-Minas, 1882.	26
Figura 2.3. – Ilustração esquemática de uma <i>Hydroshield</i> .	29
Figura 2.4. – Ilustração esquemática de uma EPB.	30
Figura 2.5 – Ilustração esquemática de uma TBM escudo único.	31
Figura 2.6. – Ilustração esquemática de uma TBM escudo duplo.	32
Figura 2.7 – Ilustração esquemática de uma TBM aberta.	33
Figura 2.8 – Representação da fragmentação causada pelos discos de corte.	35
Figura 2.9 – Esquematização da TBM: discos de corte, cabeça de corte e sapata de fixação.	35
Figura 2.10 – Remoção do material resultante da escavação através de correias transportadoras (a) e trado helicoidal (b).	36
Figura 2.11 – Configuração da máquina BraBo.	38
Figura 2.12.– Indicação dos bicos de corte na cabeça de corte.	39

Figura 2.13.– Atuadores pontuais e lineares no bloco cilíndrico. _____	40
Figura 2.14.– Divisão primária pelo <i>Brazilian Test</i> ._____	41
Figura 2.15 – Vista exterior da tuneladora Brabo com seus equipamentos de desmonte instalados._____	42
Figura 2.16 – Divisão secundária da rocha._____	43
Figura 2.17. Corte lateral do escudo da tuneladora BraBo._____	43
Figura 2.18 - Equipamento utilizado para remoção de solo e detritos de rocha em locais de mineração._____	44
Figura 2.19. Aplicações da tecnologia do jato de água._____	45
Figura 2.20 - Esquema dos componentes principais do sistema de corte por jato de água._____	46
Figura 2.21 - Esquema da cabeça de corte._____	46
Figura 2.22 - Ilustração esquemática da fraturação induzida por jato de água._____	47
Figura 2.23 - Fratura induzida no mármore por jato de água._____	47
Figura 2.24 - Fratura induzida no meta-arenito por jato de água._____	47
Figura 2.25. Parâmetros do processo de hidrodemolição. _____	48
Figura 2.26 – Esboço do ensaio de fragilidade._____	52
Figura 2.27 – Esboço do teste de perfuração em miniatura Sievers' J-Value (SJ)._____	53

Figura 2.28 – Esboço do teste de abrasão AV e de abrasão em disco de corte AVS.	54
Figura 2.29 – Esboço do teste de abrasão modificado CERCHAR.	55
Figura 3.1 – Máximo impulso bruto por disco recomendado.	66
Figura 3.2 – Velocidade de rotação da cabeça de corte.	67
Figura 3.3 – Quantidade normal de discos na cabeça de corte.	67
Figura 3.4 – Fator de fraturamento.	70
Figura 3.5 – Gráfico correlacionando os índices S_{20} e SJ ao índice de perfuração DRI.	71
Figura 3.6 – Fator de correção para valores de $DRI \neq 50$.	72
Figura 3.7 – Influência da porosidade no fator de fraturação equivalente.	72
Figura 3.8 – Fator de correção para $d_c \neq 283$.	73
Figura 3.9 – Penetração básica para $d_c = 483$ mm e $a_c = 70$ mm.	75
Figura 3.10 – Comparação entre as taxas de penetração para a TBM tradicional e para a TBM BraBo.	77
Figura 3.11 – Relação entre o índice DRI, conteúdo de quartzo e índice BWI.	78
Figura 3.12 – Relação entre o índice DRI, índice BWI e o valor de abrasão AV.	78

Figura 3.13 – Relação entre o índice AV, tipo de rocha e o valor de abrasão do disco de corte AVS.	79
Figura 3.14 – Durabilidade dos discos em horas.	80
Figura 3.15 – Fator de correção para o diâmetro da TBM.	81
Figura 3.16– Fator de correção para o conteúdo de quartzo.	82
Figura 3.17 – Comparação entre o valor de durabilidade dos sistemas de corte.	84
Figura 3.18 – Comparação entre o número de unidades trocadas em cada sistema de corte.	85
Figura 3.19 – Comparação entre as taxas de avanço em cada sistema de corte.	87
Figura 3.20 – Comparação entre os custos dos sistemas de corte analisados.	89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso.	49
Tabela 2.2 – Classificação da abrasividade de acordo com o índice CAI.	55
Tabela 2.3 - Parâmetros do maciço rochoso e da tuneladora considerados no modelo da taxa de penetração.	55
Tabela 2.4 - Parâmetros do maciço rochoso e da tuneladora considerados no modelo de durabilidade do disco.	57
Tabela 3.1. – Valores de CAI, S_{20} e SJ.	62
Tabela 3.2. – Valores de resistência a compressão monoaxial e módulo elástico.	62
Tabela 3.3. – Valores do conteúdo de quartzo encontrados na análise microscópica.	62
Tabela 3.4. – Dados geométricos relativos as discontinuidades.	64
Tabela 3.5. – Características definidas para a TBM.	68
Tabela 3.6 – Classes de fratura com distância entre os planos de fraqueza.	69
Tabela 3.7 – Ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza.	69
Tabela 3.8 – Fatores de correção relacionados ao maciço rochoso.	73
Tabela 3.9 – Resumo dos fatores de correção para o maciço rochoso.	74
Tabela 3.10 – Resumo dos fatores de correção para a tuneladora.	74

Tabela 3.11 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso.____76

Tabela 3.12 – Parâmetros utilizados no cálculo da Taxa de Penetração da tuneladora BraBo._____76

Tabela 3.13 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso._____83

Tabela 3.14 – Valor de durabilidade dos discos de corte._____83

Tabela 3.15 – Valor da taxa de avanço._____86

RESUMO

As máquinas tuneladoras atuais alcançaram sucesso na realização de obras de túneis nas últimas 5 décadas. Apesar disso, sua tecnologia ainda é muito parecida com a apresentada pelas primeiras máquinas, construídas há mais de 50 anos. Em geral, os equipamentos dotados de tais tecnologias apresentam elevado custo de capital e de operação. Dentre as principais razões para o elevado custo, destaca-se o princípio de fraturamento mecânico do maciço através de discos, pastilhas e brocas de corte. Diante de tal cenário a empresa BraBo propôs um novo segmento de máquinas tuneladoras que pode ser até 5 vezes mais rápida e econômica que as máquinas atuais. Uma das principais modificações é relacionada ao sistema de corte que passa a ser baseado na escavação por hidrodemolição com jatos de água. Com o aparecimento desta nova tecnologia, surgiu a necessidade de uma comparação com a TBM tradicional para avaliar e quantificar o potencial da TBM BraBo. Os parâmetros buscados foram a taxa de penetração, durabilidade dos sistemas de corte, taxa de avanço e custos. Além disso, o cenário escolhido para a realização de tal comparação foi um maciço em rocha dura, uma das situações mais problemáticas, em se tratando de escavação mecanizada. Em todas as análises realizadas, os parâmetros de Brabo TBM se mostraram, em média, três vezes superiores aos parâmetros de TBM tradicional, confirmando a alta produtividade esperada para a nova tecnologia.

Palavras-chave: TBM. Rocha dura. Discos de corte. BraBo. Hidrodemolição com jato de água.

ABSTRACT

The current Tunnel Boring Machines achieved success in creating works of tunnels over the past five decades. Nevertheless, their technology is still very similar to the one presented by the first machine, built more than 50 years ago. In general, the equipment incorporating such technologies have high capital cost and operation. Among the main reasons for the high cost, there is the principle of mechanical fracturing of the rock mass through the discs, pads and drill cutting. Faced with such a scenario the company Brabo proposed a new segment of TBMs which can be up to 5 times faster and cheaper than current machines. One of the main changes is related to the cutting system renumbered based on the excavation by hydrodemolition with water jet. With the advent of the new technology, the need for a comparison with the traditional TBM to evaluate and quantify the potential of the BraBo TBM appeared. The analysed parameters were penetration rate, durability of cutting systems, advance rate and costs. Moreover, the choice for the realization of such a comparison scenario was a hard rock mass, one of the most problematic situations in the case of mechanized excavation. In all analyzes, the parameters of Brabo TBM showed on average three times higher than the parameters of traditional TBM, confirming the high expected productivity to new technology.

Keywords: TBM. Hard rock. Disc cutters. BraBo. Hydrodemolition with water jet.

1. Introdução

1.1. Apresentação do problema e justificativa

As obras subterrâneas e, mais especificamente, as obras de túneis, constituem um importante instrumento de favorecimento do progresso da humanidade. Não é por coincidência que as maiores obras subterrâneas encontram-se nas cidades mais desenvolvidas, como, por exemplo, o canal subterrâneo de drenagem externa da área metropolitana de Tóquio. Essas obras promovem um grande crescimento econômico na medida em que permitem reconquistar espaços já ocupados e deixam outros disponíveis em superfície, onde podem desenvolver-se novas estruturas.

De fato, os túneis permitiram a construção de vias de comunicação capazes de conectar diretamente lugares de difícil acesso, superando obstáculos naturais como zonas montanhosas, lagos, rios e até mares. Os túneis ajudaram e ajudam a construir uma rede de ligações que favorecem a movimentação de pessoas e mercadorias.

O melhoramento da rede de conexões, somado a necessidade de reduzir impactos ambientais e urbanísticos das obras de grande porte, constituíram um forte incentivo para um desenvolvimento de novas tecnologias para a construção de obras subterrâneas. Nesse contexto, a construção de túneis aparece como uma das principais ferramentas para a exploração do subterrâneo e é de grande importância no planejamento e na gestão de espaço.

O uso do método mecanizado, que utiliza as chamadas TBMs (*Tunnel Boring Machines*) ou tuneladoras, tem sido cada vez mais comum nas obras de túneis. Em comparação com os métodos tradicionais, como o NATM (*New Austrian Tunnelling method*), apresentam maior eficiência, rapidez e facilidade de execução. Apesar do custo elevado, a consideração dos custos indiretos, sociais e ambientais tornam o método mecanizado mais econômico, como mostra a Figura 1.1 apresentada por Noronha (2010).

Figura 1.1 – Comparação entre os custos do método mecanizado e do tradicional.



Fonte: Noronha, 2010.

Apesar do sucesso alcançado nas últimas cinco décadas, segundo Noronha (2010), as máquinas tuneladoras ainda se encontram em estado inicial. As TBMs atuais são bastante similares à primeira tuneladora moderna, criada por Robbins há pouco mais de 50 anos. Em geral, observa-se que os equipamentos dotados de tais tecnologias apresentam elevado custo de capital e de operação. Dentre as principais razões para o elevado custo total na utilização destas máquinas, destaca-se o princípio de fraturamento mecânico do maciço através de discos, pastilhas e brocas de corte.

Além de demandar elevadas potências de acionamento, a operação na interface de perfuração da TBM tradicional gera desgaste das ferramentas de corte, limitando a navegabilidade e ocasionando uma consequente redução na eficiência global do processo (taxa de avanço). Dessa forma, o ciclo de vida desses equipamentos está atrelado às especificidades de cada obra (geologia, escala geométrica e avanço total). A reutilização e reciclagem destas máquinas são incomuns, praticamente inexistentes. Além disso, existem poucas fabricantes de máquinas tuneladoras utilizadas neste tipo de obra, a maior parte delas é da empresa americana *Robbins* ou da empresa alemã *Herrenknecht AG*.

Este cenário tecnológico, no Brasil e na América Latina, cria oportunidades e condições ideais para o desenvolvimento de equipamentos

inovadores mais econômicos e eficientes. O grande volume de obras de túneis em diferentes estágios de desenvolvimento no Brasil estimula ainda mais esse mercado.

Tendo em vista a demanda reprimida de obras de túneis no Brasil e a dificuldade ao acesso a máquinas tuneladoras, a empresa BraBo (*Brazilian Borer*) apresentou uma proposta de inovação tecnológica para uma nova geração de máquinas. A empresa desenvolveu uma tecnologia de perfuração com *waterjet* (corte por jato d'água) e um simultâneo revestimento através de uma extrusora de concreto. A tuneladora BraBo inova simultaneamente na parte de produto e no processo construtivo de túneis e micro-túneis.

Com a promissora expectativa de taxas de avanço de 300 m/dia contra os atuais 60m/dia das tuneladoras tradicionais, e obtenção de um equipamento mais eficiente, econômico e acessível, a tuneladora BraBo ainda está em fase de estudos. Apesar de ainda não existirem resultados de campo, uma comparação entre a produtividade das máquinas com a tecnologia tradicional e a inovadora é de extrema importância para compreensão do potencial da iniciativa empreendedora.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise de produtividade de uma tuneladora tradicional e, de forma mais simples, de uma tuneladora BraBo na escavação de um maciço composto por rocha dura.

1.2.2. Objetivos específicos

Apresentam-se também os objetivos específicos a serem executados ao longo do trabalho:

- Apresentar as características principais do funcionamento do sistema de corte por discos de corte e por hidrodemolição através de jato de água;

- Calcular parâmetros que quantifiquem o desempenho de cada máquina: taxa de penetração, taxa de avanço e durabilidade de cada sistema de corte;
- Associar os parâmetros acima citados ao custo de cada sistema e assim obter o custo/benefício de cada máquina;
- Fornecer uma análise sobre a nova tecnologia proposta pela empresa BraBo;

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema a ser estudado, apresenta o contexto que motivou o trabalho e os objetivos a serem alcançados com o mesmo.

O segundo capítulo consiste em uma revisão da literatura sobre o assunto do trabalho. Os temas abordados nesta seção trazem uma descrição das máquinas tuneladoras, TBMs tradicionais e a BraBo, e seus respectivos mecanismos de funcionamento. Além disso, também aborda o método teórico utilizado no cálculo da produtividade de cada tuneladora.

O terceiro capítulo apresenta os cálculos e os resultados obtidos a partir dos cálculos, taxa de penetração, taxa de avanço e durabilidade dos sistemas de corte, relacionando estes parâmetros com os custos de cada sistema de escavação.

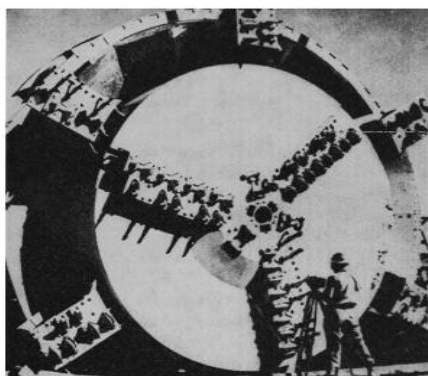
O quarto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, as limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2. Aspectos teóricos relevantes

Segundo Concilia (2012), a origem dos túneis remonta a idade da pedra, no período em que foram feitas as primeiras descobertas metalúrgicas. Porém, somente na metade do século XIX, devido à industrialização dos processos produtivos, iniciou-se um aperfeiçoamento contínuo das técnicas e métodos de construção que proporcionou a passagem de uma prática artesanal para uma ciência de construção de túneis. Também desta época datam as primeiras experiências de emprego da escavação mecanizada, remonta a 1851 a primeira tentativa de construção de uma máquina tuneladora para escavação em rocha, realizada pelo engenheiro americano Charles Wilson. Porém, devido a problemas mecânicos e da falta de tecnologia dos equipamentos de corte, o método não foi capaz de competir com as técnicas de perfuração e escavação com explosivos, que se encontravam em elevado desenvolvimento na época.

Desde então, praticamente nenhuma tentativa foi feita até 1952 quando James S. Robbins encontrou uma maneira prática e economicamente conveniente para a utilização de máquinas que escavam continuamente e em plena seção, tanto rocha como terrenos abaixo do nível d'água. Robbins projetou uma TBM (*Tunnel Boring Machine*) para escavar quatro túneis em *Oahe Dam*, nos Estados Unidos. Essa tuneladora, mostrada na Figura 2.1, possuía um diâmetro de 7,85 metros e era equipada com uma cabeça de corte contendo duas unidades que giravam no sentido oposto, equipadas com ponteiros de aço-carbono montadas na seção radial e discos de corte nas linhas paralelas. É importante observar que esta máquina escavou com sucesso formações sedimentárias rígidas com um avanço diário de 45 metros.

Figura 2.1 – Primeira TBM moderna construída pela empresa Robbins em 1952.



Fonte: Fonte: Noronha, 2010.

Segundo Concilia (2012), é correto afirmar, portanto, que o desenvolvimento tecnológico da escavação mecanizada começou nos anos 1960 e cresceu rapidamente, graças ao contínuo progresso tecnológico e a evolução da área geotécnica. O avanço aconteceu em direção às duas condições extremas para a aplicação do método: no caso de condições geomecânicas difíceis em termos de estabilidade da frente de trabalho e no caso de escavação em formações rochosas com presença de rochas abrasivas e elevada resistência mecânica.

No Brasil, segundo Silva (2006), os primeiros túneis rodoviários foram abertos por volta de 1860. A obra mais importante do período foi a série de 15 túneis que ficou conhecida como Seção 2 da Estrada de Ferro Dom Pedro II, no Rio de Janeiro. Os túneis em rocha foram perfurados a ponteiro, marreta e pólvora negra, pois ainda não existiam as perfuratrizes mecânicas e a dinamite ainda não havia sido inventada. A Figura 2.2 retrata a inauguração do túnel da Estação de Ferro Rio-Minas em 1882.

Figura 2.2 - Inauguração do túnel com a presença do Imperador e comitiva, Estação de Ferro Rio-Minas, 1882.



Fonte: Silva, 2006.

O planejamento e a construção dos sistemas de metrô e de túneis rodoviários nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, levaram ao desenvolvimento da engenharia de túneis modernos no Brasil nas décadas de 1950 e 1960. Segundo Carvalho (2006), nas décadas de 1960 e 1970, sobressaíram-se as obras de túneis grandes e importantes, principalmente na capital do Rio de Janeiro. Para tanto, diversos métodos construtivos foram utilizados no período: Túnel convencional ou NATM, valas a céu aberto (*cut & cover*) e TBMs, esta usada pela primeira vez na construção da Linha 1 do metrô de São Paulo na década de 1970.

Atualmente, para a construção de túneis de pequena e média seção, o método de escavação com TBM é certamente o mais difundido. Nos últimos 30 anos tem crescido o desenvolvimento de máquinas para a escavação de túneis de grande diâmetro em condições geomecânicas adversas, condições tidas como impossíveis até algumas décadas atrás. Isso ocorreu graças ao desenvolvimento de eficazes sistemas de sustentação para frentes de trabalho instáveis e equipamentos adequados para a instalação dos mesmos e, de técnicas para a consolidação de formações rochosas (injeções de consolidação e/ou impermeabilização com nata de cimento e aditivos químicos, tratamento com *jet grouting*, etc.). A maior contribuição veio da evolução tecnológica da TBM, seja em termos de potência instalada para a rotação da cabeça cortante, seja em termos de força máxima aplicável aos discos de corte.

Desde a época das primeiras tentativas de construção de tuneladoras, diversos construtores entraram no desafio de desenvolver novas tecnologias. Com isso, foram introduzidos no mercado diferentes tipos de máquinas, das quais, cada uma se adaptava melhor às diversas condições geológicas do traçado a ser escavado ou as diferentes condições de projeto. Existem muitos esquemas, a nível mundial, para a classificação de máquinas de escavação para túneis, eles levam em consideração as diferentes características das tuneladoras.

Para citar algumas das classificações disponíveis e mais utilizadas para TBM, que mudam de acordo com cada país ou fabricante tem-se: o Comitê Alemão para Construções Subterrâneas (DAUB), que faz as distinções entre TBMs com e sem *Shield*; a Associação Francesa de Túneis e Espaço Subterrâneo (AFTES), que diferencia as TBMs com base no tipo de suporte que a máquina oferece a frente de escavação: nenhum, periférico, periférico e

frontal; a Sociedade de Engenheiros Civis do Japão (JSCE), que faz a distinção entre TBM aberta e TBM fechada e a classificação da empresa *Herrenknecht* que faz a distinção com base exclusivamente nos diâmetros das máquinas.

Apesar das diferentes nomenclaturas, as máquinas tuneladoras são essencialmente constituídas de três partes (Patriarchi, 2011):

- Uma cabeça de corte, sobre a qual são colocados os acessórios responsáveis pelo abatimento da rocha, que tem a função de desagregar a rocha;
- Um sistema de propulsão e guia, destinado a ‘empurrar’ a cabeça e fazer a máquina avançar;
- Um sistema de despejo do material escavado capaz de liberar a frente de trabalho dos detritos e encaminhá-los a um meio de transporte.

2.1. TBM com princípio de corte tradicional

Tuneladoras com princípio de corte tradicional são máquinas que escavam túneis através de um grande disco giratório (cabeça de corte) equipado com discos de corte que servem para aplicar o carregamento contra o maciço. Hoje esta tecnologia se desdobra em diversos tipos de tuneladoras que permitem escavar desde rochas duras até terrenos arenosos. Levando-se em consideração o meio de trabalho, pode-se dizer que existem dois tipos de tuneladoras: tuneladoras para escavação em meio rochoso e tuneladoras para escavação em solos. A seguir será apresentada uma breve descrição dos dois grupos e de suas subdivisões, de forma a proporcionar um melhor entendimento do assunto. As informações contidas nesse item foram retiradas de Concilia (2012).

Quando o meio de trabalho é solo, a máquina a ser utilizada é a TBM para Terrenos Não-Portantes. Essas tuneladoras se caracterizam por uma câmara de pressão de confinamento atrás da cabeça cortante que é isolada da parte posterior da TBM mediante um diafragma. A pressão é garantida pelo mesmo material escavado que se acumula dentro da câmara, de modo a sustentar a frente de trabalho e/ou balancear a pressão hidrostática do fluxo de

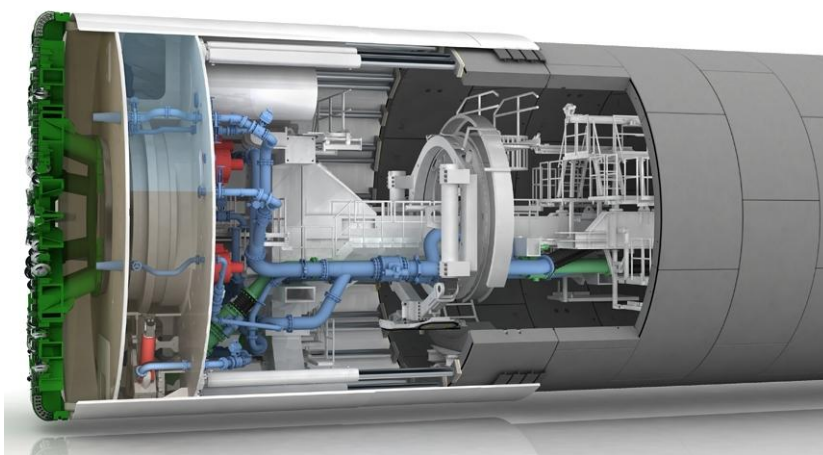
água do lençol freático. A máquina avança através da ação de pistões que contrastam contra os revestimentos precedentemente instalados.

Máquinas para terrenos não-portantes podem subdividir-se em três categorias principais: *Shield Bentonítica (Hydroshield)*, TBM com ar comprimido e *EPB - Earth Pressure Balance*.

As *Hydroshields*, também conhecidas como *Shield Bentonítica*, foram desenvolvidas recentemente para superar algumas exigências técnicas em termos de segurança e estabilidade do terreno. Estas máquinas escavam terrenos não coesivos acima e abaixo do nível da água, evitam o uso de ar comprimido e perturbam minimamente o ambiente circunstante.

A TBM do tipo *Hydroshield*, ilustrada na Figura 2.3, é caracterizada por uma cabeça cortante que escava a plena seção, garantindo um confinamento e o suporte da frente de trabalho através da manutenção da pressão pelo “fluido de escavação” no interior da câmara. Geralmente este fluido é uma lama bentonítica e é utilizado por formar uma película impermeável (*cake*) na frente de trabalho. Tais máquinas permitem que o fluido saia da câmara de escavação para o exterior junto com o material escavado, através de variações regulares de pressão. A mistura é extraída através de bombas e direcionada para uma estrutura de separação na superfície.

Figura 2.3. – Ilustração esquemática de uma *Hydroshield*.



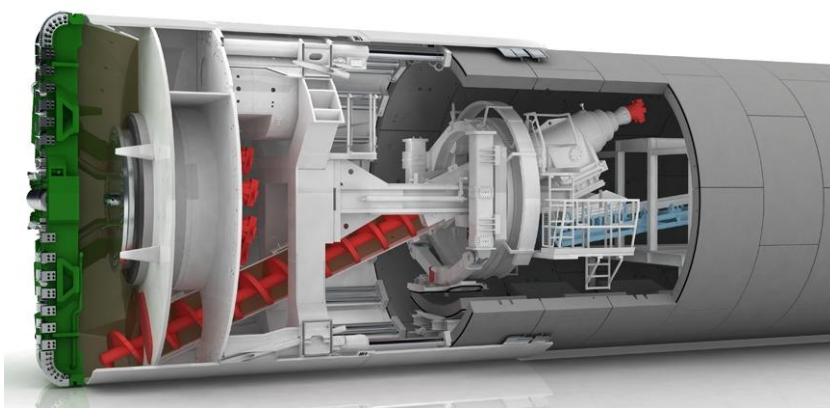
Fonte: Herrenknecht, 2014.

O ciclo de trabalho da *Hydroshield* é descontínuo e compreende avanço por um comprimento equivalente ao comprimento dos pistões de impulso, montagem dos anéis de revestimento definitivo e novo avanço.

Ao invés de uma pressurização bentonítica como no caso da TBM *Slurry*, na metodologia EPB a pressão é garantida pelo próprio terreno escavado que é condicionado com aditivos específicos no interior da câmara de escavação.

As EPBs são máquinas empregadas para escavação em terrenos não homogêneos, brandos, não coesivos e abaixo do nível da água. O material é extraído ciclicamente através de um sistema de perda de pressão que consente a passagem do material da câmara de escavação para o interior da máquina, através de um trado helicoidal. A Figura 2.4 ilustra o esquema de uma TBM EPB.

Figura 2.4. – Ilustração esquemática de uma EPB.



Fonte: Herrenknecht, 2014.

Por último, em TBMs com ar comprimido (*Compressed Air TBM*) o confinamento e o suporte da frente de trabalho são garantidos pela pressurização do ar na câmara de escavação. O material escavado é extraído continuamente por um sistema de extração de perda gradual de pressão e transporta o material da câmara de pressão para o interior da TBM, que se encontra em condições de pressão atmosférica, e posteriormente por correias transportadoras.

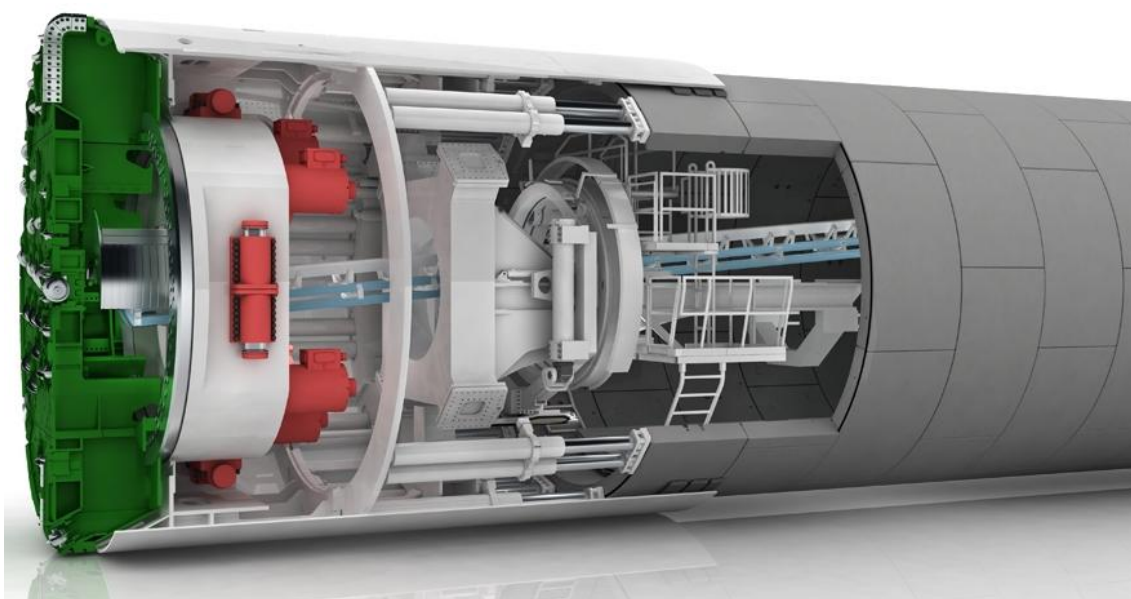
Nos últimos anos, graças ao desenvolvimento tecnológico e a uma crescente relutância, principalmente por razões médicas, o uso da metodologia de ar comprimido tem sido abandonado em favor do desenvolvimento das técnicas *Slurry Shield* e EPB.

As máquinas para escavação em rocha podem ser subdivididas em três categorias principais: TBM com escudo único, TBM com escudo duplo e TBM aberta.

A TBM com escudo único (*Single Shield TBM*) é utilizada em maciços rochosos que possuem resistência variando de baixa à moderada, em meios instáveis com possibilidade de sofrer colapso. Esta tuneladora, ilustrada na Figura 2.5, é capaz de fornecer automaticamente o suporte lateral ao túnel durante a fase de escavação.

O ciclo de trabalho é descontínuo e compreende: avanço por um comprimento equivalente ao comprimento dos pistões, colocação de um novo anel de revestimento, realização da nova ancoragem (usando os pistões de força longitudinal contra os anéis de revestimento) e novo avançamento.

Figura 2.5 – Ilustração esquemática de uma TBM escudo único.



Fonte: Herrenknecht, 2014.

Os componentes principais da TBM com escudo único compreendem a cabeça de corte, o escudo de proteção, monolítico ou articulado, e contem os principais componentes da máquina e o sistema de impulso/força que consiste em uma série de pistões hidráulicos longitudinais que contrastam contra o revestimento do túnel.

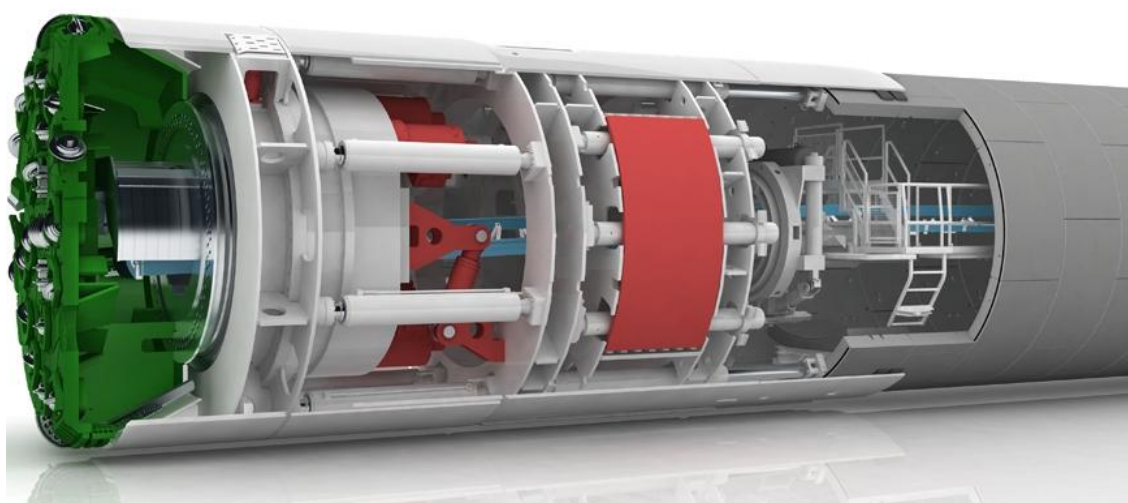
A tuneladora com escudo único atende a técnica relacionada a geologia, mas não em termos de sistema de suporte e produtividade. Para que seu emprego seja conveniente ou possível, é necessário que seja montado um sistema de pré-fabricação do revestimento e, que a rocha seja facilmente desagregável de modo que o ciclo de avanço tenha duração aceitável.

Na TBM com escudo duplo (TBM *Double Shield*), existem dois escudos: no primeiro está instalado a cabeça cortante com os seus componentes mecânicos e relativos aos motores; no segundo, ligado ao primeiro através de cilindros de impulso, são instalados os *grippers*. Os dois escudos são conectados telescopicamente de modo a assegurar a continuidade da escavação durante o avanço do primeiro em relação ao segundo.

Para o avanço da TBM com escudo duplo não é necessária a instalação de um revestimento: tais máquinas são capazes de montar um revestimento pré-fabricado ou um suporte provisório, onde for necessário, simultaneamente a fase de escavação. Essa fase pode ser efetuada e suportada como se estivesse sendo escavada com uma TBM aberta, porém com um grau de segurança maior, por causa do escudo. Onde for necessário, a TBM com Escudo Duplo pode realizar o contraste diretamente sobre os revestimentos pré-fabricados, ao invés dos *grippers*.

A TBM com Escudo Duplo, ilustrada na Figura 2.6, é composta por uma cabeça de corte, um escudo de proteção, monolítico ou articulado, que contem os principais componentes da máquina e um duplo sistema de impulso/força que compreende uma série de pistões hidráulicos longitudinais e uma série de *grippers*, posicionados no interno da parte do escudo anterior e que contrasta contra a parede do túnel.

Figura 2.6. – Ilustração esquemática de uma TBM escudo duplo.



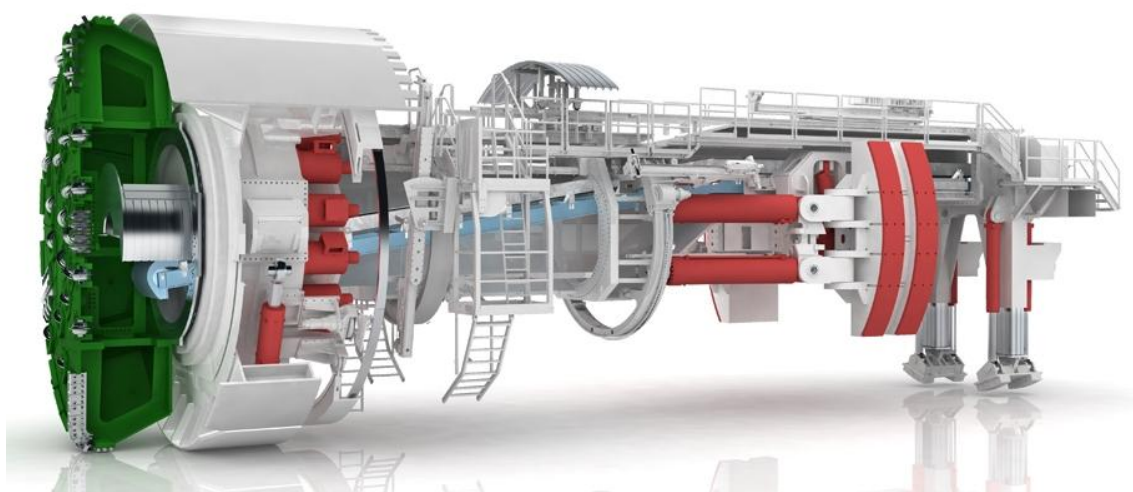
Fonte: Herrenknecht, 2014.

As tuneladoras *Double Shields* são utilizadas em uma ampla gama de qualidade de terrenos, das rochas brandas e/ou fraturadas até as duras e abrasivas, neste último caso com velocidades comparáveis a uma TBM aberta. A velocidade de avanço depende apenas do tempo de escavação, já que as armaduras e/ou pré-revestimentos são montados contemporaneamente à escavação.

Para Castro (2013) a TBM com escudo duplo é indicada principalmente em situações em que o maciço rochoso apresenta heterogeneidade de propriedades, contendo rochas com excelentes propriedades geomecânicas acompanhadas de zonas de falhas geológicas importantes, que apresentem ou não material de preenchimento com baixa resistência, tais como argilas e siltes. A aplicabilidade da *Double Shield* em meios heterogêneos é viável devido à fácil capacidade de adaptação deste tipo de tuneladora, que opera no modo *gripper* contínuo no maciço resistente e no modo *shield* descontínuo nas regiões de falhas.

As TBMs abertas, ilustradas na Figura 2.7, são utilizadas nos casos em que a frente de trabalho e o terreno circunstante são caracterizados por elevada capacidade auto-portante e não é necessária a aplicação imediata da estrutura de suporte. Este tipo de tuneladora não possui escudo, sendo aberta ao longo de todo o seu comprimento.

Figura 2.7 – Ilustração esquemática de uma TBM aberta.



Fonte: Herrenknecht, 2014.

O ciclo de trabalho é descontínuo e compreende as fases de escavação por um comprimento equivalente ao comprimento dos pistões,

reposicionamento dos *grippers* e retomada das escavações. Por ser objeto de análise do presente estudo, o funcionamento desta tuneladora será apresentado de forma mais detalhada.

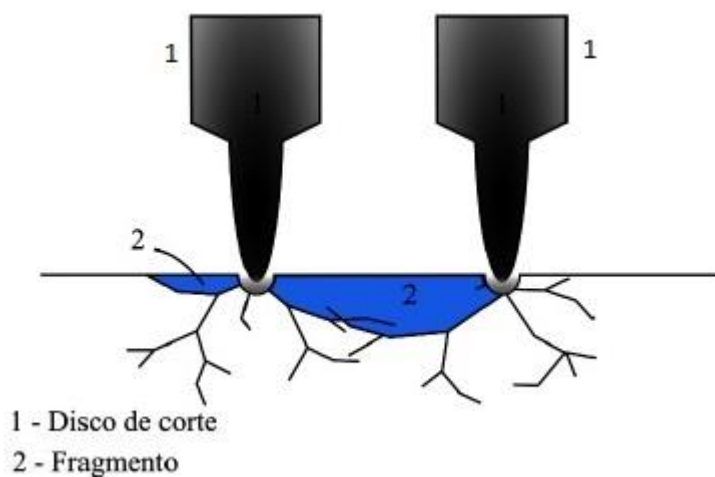
Uma TBM aberta é composta por elementos móveis como a cabeça cortante e o sistema de transporte do material resultante da escavação, um elemento fixo que contrasta os pistões de força, através de um ou mais pares de *grippers* que ancoram a TBM na superfície de contorno do túnel e uma zona posterior que contém o mecanismo de avanço da máquina e os elementos de *back-up*.

A cabeça, dotada de um movimento rotativo, é comandada por um motor elétrico localizado na zona posterior da máquina, com sistemas, eletromecânicos ou hidráulicos, de redução de velocidade. Sobre ela são colocados discos e dentes que permitem aplicar o carregamento contra o maciço, de forma que as arestas dos discos entrem em contato com a rocha, que pode ser compacta ou fragmentada.

O processo de escavação da rocha por disco de corte acontece na medida em que a máquina pressiona o maciço ao mesmo tempo em que a sua cabeça de corte gira. O contato acontece entre os discos de corte (que são responsáveis pela quebra da rocha) e a frente de escavação.

Segundo Zhao (2006), a perfuração de um túnel envolve um processo contínuo de fissuração e fragmentação da rocha. No entalhamento ocorre a penetração dos discos de corte, resultando no esmagamento da rocha e criando uma zona de tensão onde as fissuras se propagam em todas as direções. O despedaçamento acontece na medida em que essas fissuras atingem a superfície livre ou encontram outras rachaduras causadas por cortadores vizinhos, formando os fragmentos e, conseqüentemente, prossegue-se a escavação (SAMPAIO, 2009). O processo da fragmentação da rocha é ilustrado na Figura 2.8.

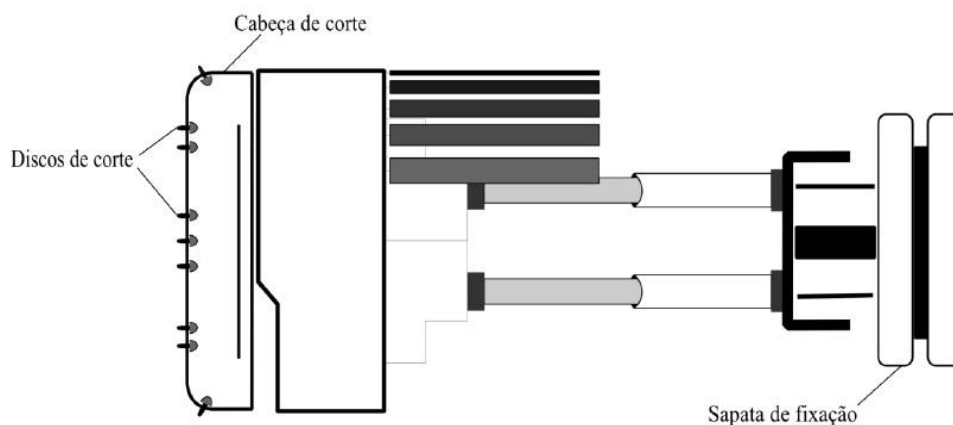
Figura 2.8 – Representação da fragmentação causada pelos discos de corte.



Fonte: Sampaio, 2009.

Os órgãos de propulsão e contraste são constituídos por um ou mais pares de sapatas de fixação, que imobilizam o corpo central da TBM e impedem o movimento na direção longitudinal, servindo de suporte para que a cabeça de corte aplique a força necessária para a fissuração com os discos de corte. Os outros cilindros do corpo da máquina, apoiando-se na estrutura ancorada na parede do túnel, fazem a cabeça de corte avançar durante um ciclo de abatimento. A Figura 2.9 apresenta um esquema da localização dos discos de corte, cabeça de corte e sapatas de fixação.

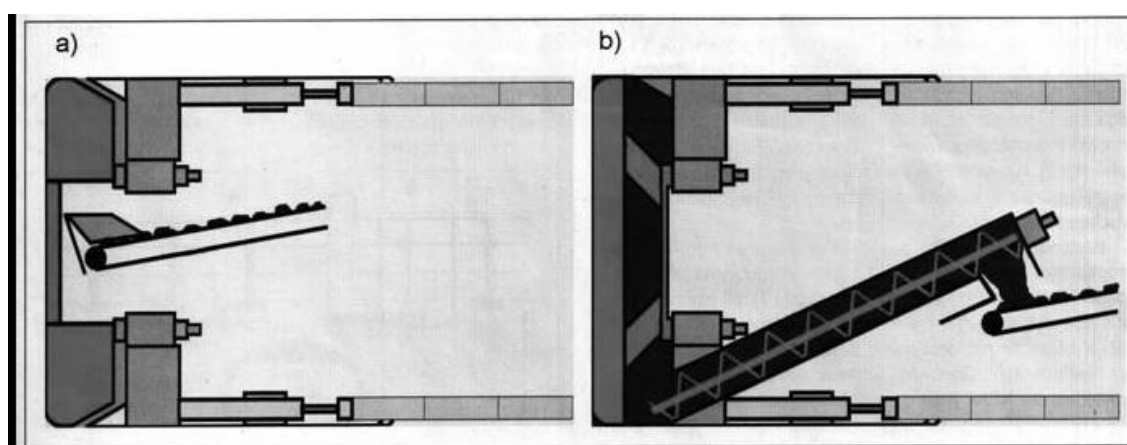
Figura 2.9 – Esquematização da TBM: discos de corte, cabeça de corte e sapata de fixação.



Fonte: Sampaio, 2009.

O sistema de despejo do material escavado é constituído de duas partes, localizadas em zonas diferentes. A primeira parte é constituída por recipientes dispostos na periferia da cabeça de corte capazes de recolher o material resultante da escavação. Já a segunda parte é formada por um transportador que recebe os detritos provenientes dos recipientes de recolhimento e, atravessando o corpo da máquina, despeja os detritos em algum meio de transporte (vagões ou esteiras transportadoras). A Figura 2.10 ilustra o sistema de despejo de TBMs para rocha (a) e TBMs para solo (b).

Figura 2.10 – Remoção do material resultante da escavação através de correias transportadoras (a) e trado helicoidal (b).



Fonte: Sampaio, 2009.

O corpo central e a parte final da máquina possuem, além do motor, os chamados serviços acessórios, como transformadores, reservatórios de fluídos, bombas, dispositivos de iluminação, cabine de controle, ventiladores e também os equipamentos que instalam os elementos de sustentação e revestimento definitivo.

Após a máquina, segue uma espécie de reboque, em inglês *back-up*, constituído de uma estrutura capaz de desempenhar diversas funções. Entre as principais estão receber e alternar os meios de retirada dos detritos (geralmente pequenos vagões); fornecer à área de trabalho os materiais necessários (armadura, peças de substituição, etc) e, receber equipamentos que permitam a preparação de operações especiais referentes às obras de sustentação, como por exemplo, a projeção de concreto.

As TBMs abertas são utilizadas quando as formações rochosas são estáveis e, quando são empregados sistemas tradicionais de suporte, como

chumbadores, concreto projetado e cambotas metálicas a uma distância de 3 a 30 metros da frente de trabalho. Além disso, em escavações com TBMs abertas o diâmetro de escavação não pode superar os 9 metros, já que as dificuldades relacionadas ao avanço da máquina e a estabilidade da frente de trabalho crescem consideravelmente.

Tendo apresentado o funcionamento dos principais tipos de TBMs presentes no mercado atual pode-se dizer que essas máquinas são muito versáteis com relação ao meio de trabalho, já que são capazes de perfurar desde solos de baixa resistência, como argilas moles, até rochas de altíssima resistência, sem apresentar grandes perturbações no meio. No caso de rochas de boa qualidade, ainda existe a vantagem de o próprio maciço servir como autossuporte, economizando o uso de suportes ao longo das paredes do túnel.

A maior desvantagem é o custo inicial. TBMs são caras para construir, já que cada máquina é projetada de acordo com o maciço que será escavado, o que as torna de certa forma, únicas. Além disso, o custo de manutenção se torna alto devido a necessidade de reposição dos discos de corte, que pode superar o preço inicial da máquina em casos de rochas abrasivas. Outra desvantagem é a falta de flexibilidade com relação a forma do túnel, que é na grande maioria dos casos, circular.

2.2. TBM com princípio de corte inovador

Atualmente praticamente todas as tuneladoras presentes no mercado apresentam princípio de corte tradicional e são produzidas por poucas empresas, as principais são a americana Robbins e a alemã Herrenknecht. O alto custo destas máquinas e a detenção da tecnologia por poucas empresas dificultam o uso desta técnica em países emergentes, onde há o maior nicho de mercado para construção de infraestrutura.

Pensando em suprir a demanda por inovações da tecnologia atual, a BraBo tecnologia propôs uma nova máquina tuneladora que pode ser até cinco vezes mais rápida e mais econômica que as atuais. O novo equipamento, denominado BraBo (*brazilian borer* ou perfuradora brasileira), vai, pela sua característica, adaptar-se à construção de túneis em solo ou rocha. O seu desenvolvimento teve como foco a promoção de avanços tecnológicos para

obter um equipamento mais econômico, eficiente e acessível, com impactos positivos nos custos, tempo de construção e segurança.

A tuneladora BraBo vem sendo desenvolvida a partir de uma iniciativa de tornar a tecnologia das TBMs mais acessível à construção civil em países emergentes, como o Brasil. As máquinas de grande porte que estão em vigor atualmente apresentam a desvantagem de terem uma taxa de avanço relativamente baixa, que varia entre 20 e 30 metros diários. Tal desvantagem deve-se principalmente à necessidade de controle gradual dos processos mecânicos que envolvem forças muito elevadas, por exemplo, o impulso necessário para o processo de fraturamento e de travamento para o suporte e fixação (Noronha et al., 2012).

Por outro lado, o avanço da frente de escavação de uma tuneladora deve ser feito com elevada cautela, pois é necessário que o risco de desmoronamento em zonas de falhas geológicas, bem como o de vibrações excessivas e desestabilização do solo em meios urbanos, sejam evitados. Para tal, percebe-se uma necessidade por uma preferência pelos processos de “força-inteligente” (*smart-power*) em relação à “força bruta” (Noronha et al., 2012). O emprego da “força inteligente” escolhido no início do projeto consiste em quatro inovações, conforme ilustra a Figura 2.11.

Figura 2.11.– Configuração da máquina BraBo.



Fonte: Noronha, 2010.

A primeira inovação consiste no uso de um sistema de corte por meio de um jato d'água. Os possíveis fornecedores desta tecnologia à máquina são a KMT Waterjet e a WOMA Kärcher Group. A segunda inovação consiste no desmonte da rocha em etapas distintas de fragmentação por cargas estrategicamente aplicadas. A terceira inovação consiste em otimizar a execução do sistema de revestimento e suporte do túnel, o que deverá acarretar maior racionalização de recursos bem como ganho na taxa de avanço

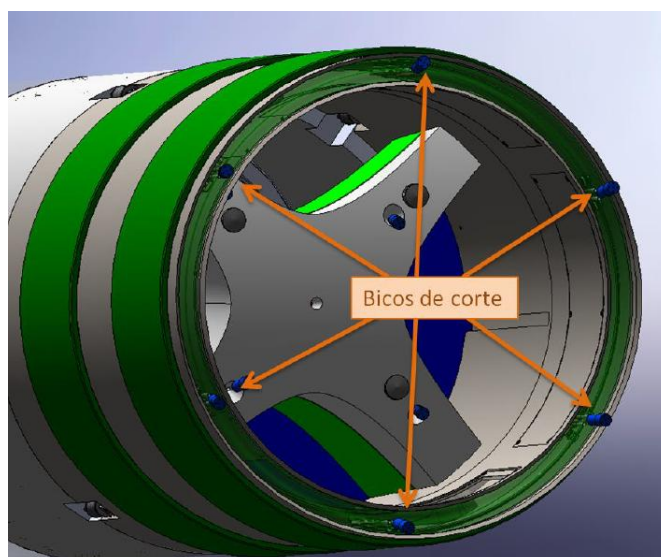
da frente de escavação (Noronha et al., 2012). A quarta inovação a ser incrementada é o sistema de movimentação da máquina, baseada na atuação de cilindros e balões hidráulicos.

Na face dianteira da tuneladora está instalado um arranjo de jatos d'água equidistantes entre si que efetuam a primeira etapa do corte em rocha. O interior da tuneladora é equipado com um *Logic Programmable Controller* (LPC), ou seja, um sistema de controle lógico programável, que é responsável pelo controle dos trajetos e das velocidades dos bicos de corte. No que tange o projeto atual, a trajetória dos bicos de corte é feita pela rotação do escudo, que compõe a cabeça giratória. Na maioria das condições geológicas, a taxa de avanço esperada para a tuneladora BraBo é de 60 a 120 metros diários, o que varia de acordo com o número de bicos de corte e outros detalhes específicos (Noronha et al., 2012).

A tecnologia de desmonte da rocha compõe a segunda inovação promovida pela tuneladora BraBo. Este processo é subdividido em quatro etapas: escavação anular; fatiamento (*Point Load Test*); divisão primária (*Brazilian Test*) e divisão secundária.

A escavação anular é feita por hidrodemolição. A Figura 2.12 ilustra os principais instrumentos envolvidos no processo de escavação anular. A face giratória da máquina possui seis jatos d'água, posicionados equidistantemente ao longo da circunferência da seção frontal do escudo (face giratória), cujos bicos de corte estão indicados.

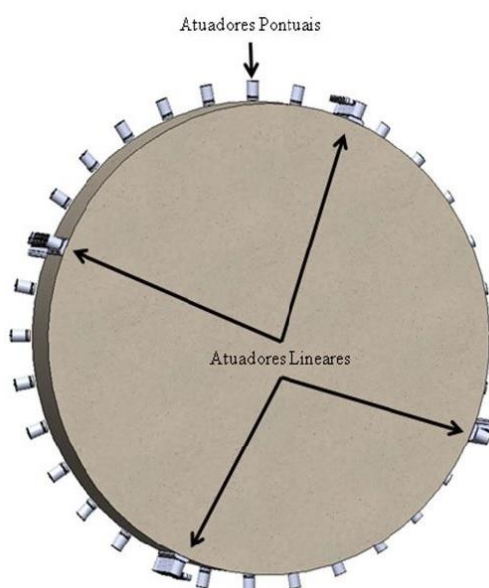
Figura 2.12.— Indicação dos bicos de corte na cabeça de corte.



Fonte: Adaptado de Noronha et al., 2013

O fatiamento compõe a segunda etapa do desmonte da rocha. O processo envolvido nesta etapa baseia-se no teste de cargas pontuais, também conhecido como *Point Load Test*. A etapa da escavação anular permite a formação de um cilindro de rocha, que será destacado do maciço pelo fatiamento por *Point Load*. A tuneladora, em seu sistema de corte por desmonte de rocha, é provida de 32 atuadores cilíndricos equidistantes posicionados ao longo da lateral do cilindro de modo que apliquem um conjunto de cargas lineares radialmente opostas, ou seja, de módulo convergente para o centro da seção do cilindro (estes atuadores estão indicados como atuadores pontuais na Figura 2.13). A aplicação das cargas lineares gera um campo de tensões no cilindro que se concentram no plano de atuação destas cargas. Uma vez que este campo de tensões supera a resistência da rocha, ocorre a ruptura do bloco, assim concluindo o processo de fatiamento da rocha.

Figura 2.13.— Atuadores pontuais e lineares no bloco cilíndrico.



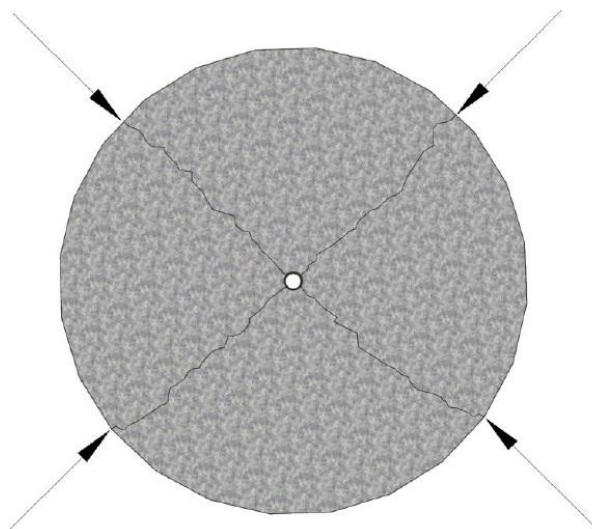
Fonte: Noronha et al., 2013.

Conforme ilustrado na Figura 2.13, os atuadores pontuais (*Point Load*) estão localizados próximos aos atuadores lineares (*Brazilian Test*), que são os instrumentos responsáveis pela terceira etapa do desmonte da rocha. Uma vez concluído o processo de remoção do bloco cilíndrico de rocha do maciço, é necessário fragmentá-lo para que sua remoção seja permitida, podendo assim a tuneladora proceder com o avanço e a escavação. Esta tarefa é cumprida

inicialmente com a divisão primária, realizada pelo *Brazilian Test*. O emprego deste processo é favorecido pelo formato cilíndrico do bloco a ser fragmentado.

Os atuadores *Brazilian Test* consistem em quatro filas de cilindros hidráulicos, dispostos de maneira análoga aos atuadores *Point Load*, de modo a formar quatro trechos iguais de cargas lineares, atuando radial e concentricamente (Noronha et al., 2013). Quando aplicadas ao bloco cilíndrico, as cargas lineares geram um campo de tensões, como no caso do *Point Load Test*, que se concentram ao longo dos dois planos de atuação destas cargas. A ruptura do bloco ocorre quando a resistência da rocha ao cisalhamento é superada pelo campo de tensões gerado pela atuação dos cilindros. O bloco, por consequência, é dividido em quatro partes, concluindo assim a etapa da divisão primária (Figura 2.14).

Figura 2.14.— Divisão primária pelo *Brazilian Test*.



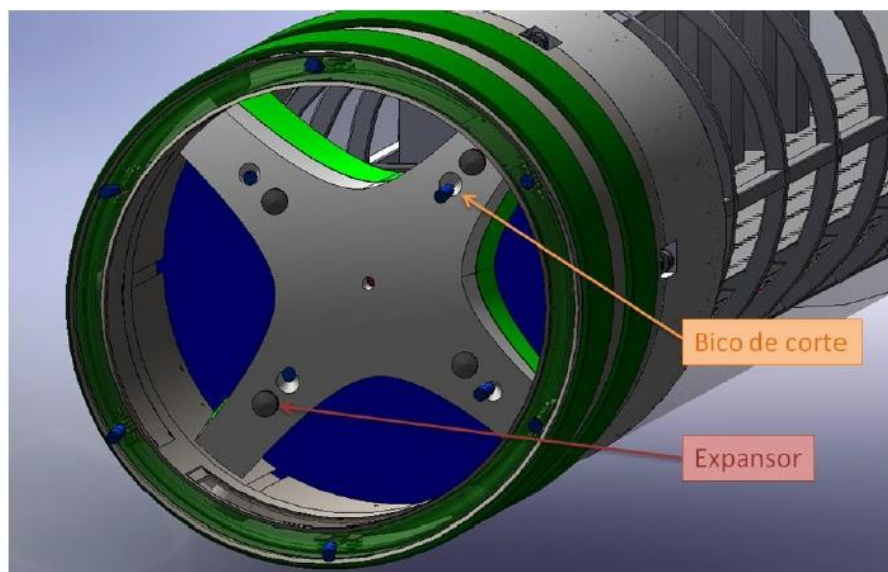
Fonte: Noronha et al., 2013.

A divisão secundária é a etapa que conclui o processo de desmonte da rocha. O sistema consiste primeiramente em uma cabeça giratória com liberdade de rotação em 90°, cuja função é permitir que as ferramentas de corte (os jatos d'água e os expansores) percorram o movimento em arco necessário para realizar o restante do fatiamento.

O formato da cabeça giratória é o de uma cruz com dentes iguais, onde a aresta de cada quadrante assemelha-se a uma curva hiperbólica (este formato é importante para facilitar a remoção do material). Cada dente da cabeça é provido de um jato d'água e um expansor, ilustrados na Figura 2.15.

Os dois são alinhados radialmente em relação ao centro da cabeça e, estão instalados em posições invertidas em relação ao dente vizinho, de tal modo que com cada giro de 90° da cabeça, o expansor possa ser inserido dentro do furo deixado pelo jato d'água do dente anterior e possa assim realizar a etapa da divisão final do bloco (Noronha et al., 2013).

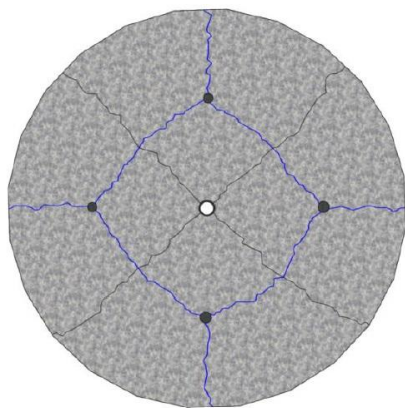
Figura 2.15 – Vista exterior da tuneladora Brabo com seus equipamentos de desmonte instalados.



Fonte: Adaptado de Noronha et al., 2013 .

O expansor tem formato cilíndrico e consiste em cunhas que, por um mecanismo de pressão por injeção de fluidos, divergem-se e aplicam uma tensão de contato no interior do bloco da rocha. A injeção do fluido nas câmaras dos expansores provoca uma pressão hidráulica em seu interior, fazendo com que as cunhas se deslizem em sentido radial em relação ao eixo do cilindro expansor. Estas expansões, provocando a tensão de contato entre as cunhas e o bloco na região do furo, por fim geram um campo de tensões que por sua vez provocará a ruptura final dos blocos de rocha conforme ilustra a Figura 2.16.

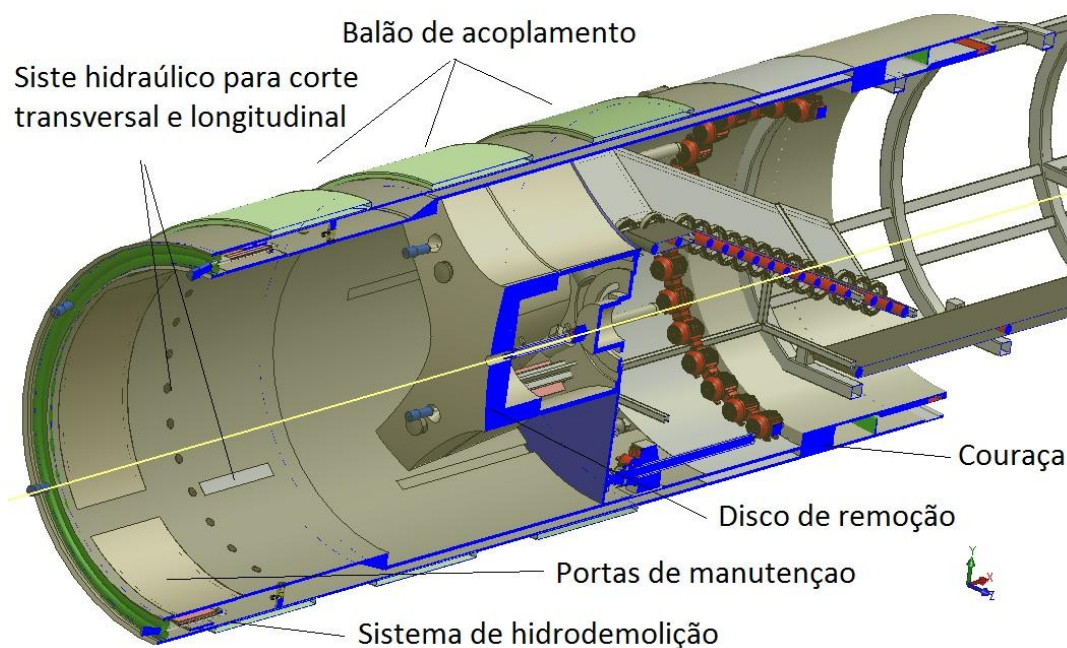
Figura 2.16 – Divisão secundária da rocha.



Fonte: Noronha et al., 2013.

Uma vez desmontada a rocha, é necessária a remoção de seus fragmentos a fim de que a tuneladora possa proceder com a escavação. O sistema de remoção é composto basicamente de um trado acoplado à cabeça giratória, com o mesmo formato desta, e de um sistema de esteiras de transporte para o material. A Figura 2.17 permite visualizar o trado e o sistema de esteiras, respectivamente. O trado deve possuir certa inclinação, ou seja, seu formato não deve ser perfeitamente prismático e sim levemente helicoidal, pois, embora esta inclinação seja pouco perceptível a olho nu, é essencial para que o material escavado possa deslizar sobre a superfície com a sua rotação e assim seja removido com eficácia.

Figura 2.17. Corte lateral do escudo da tuneladora BraBo .

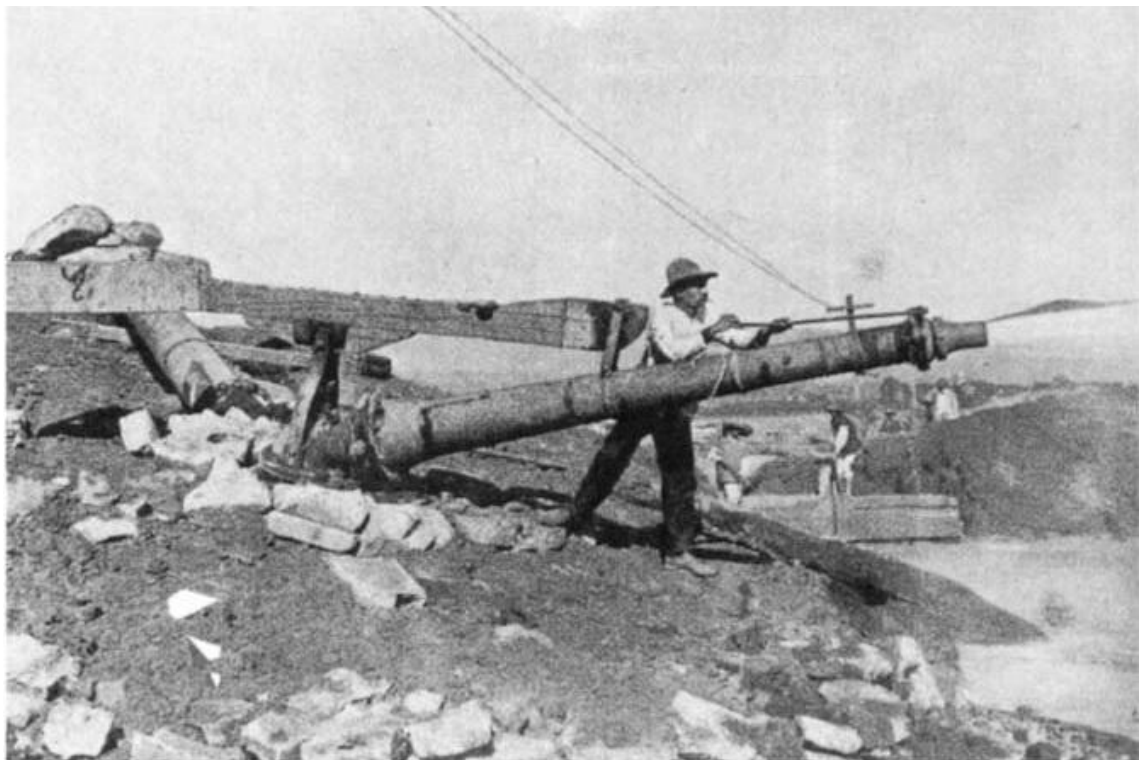


Fonte: Noronha et al., 2013.

2.2.1. Hidrodemolição como princípio de escavação

Apesar de o uso do jato de água ser uma inovação no âmbito da construção de túneis, o uso dele para outras finalidades é tão antigo quanto a engenharia humana. Segundo Momber (2005), as primeiras utilizações dos jatos d'água foram feitas para remoção de solo e, na mineração hidráulica para deslocar pedaços de rocha. A Figura 2.18 mostra um equipamento utilizado no século XIX em locais de mineração nos Estados Unidos. Na década de 1920, os jatos de água foram introduzidos na indústria de produção do aço para a descalcificação, e na indústria de fundição para a limpeza de peças. Nesse período as primeiras investigações sobre a formação do jato de água e a otimização de remoção de material foram realizadas especialmente na Alemanha.

Figura 2.18 - Equipamento utilizado para remoção de solo e detritos de rocha em locais de mineração.

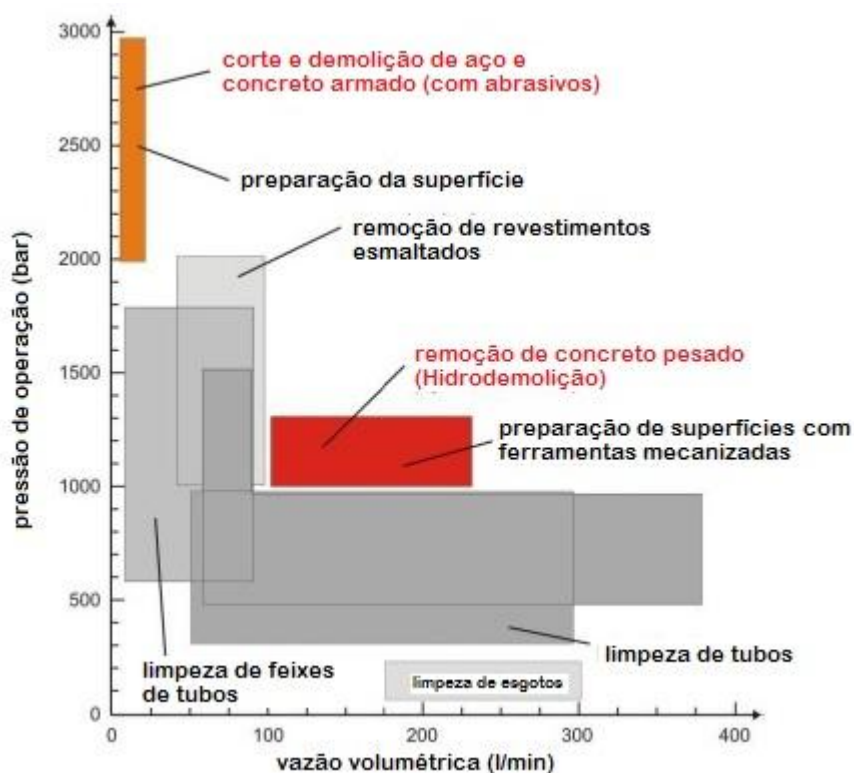


Fonte: Momber, 2005.

Após a aplicação do jato de água para finalidade de corte em 1960, a tecnologia se desenvolveu e progrediu significativamente ao longo das décadas. Em termos de taxa de energia, os equipamentos de jato de água são

agora capazes de limpar, cortar e hidrodemolir (Jeng et.al., 2004). Atualmente a tecnologia do jato de água é uma das técnicas mais flexíveis dentro da indústria e suas principais áreas de aplicação são fortemente dependentes da pressão operacional e da velocidade de fluxo volumétrico, como pode ser visto na Figura 2.19.

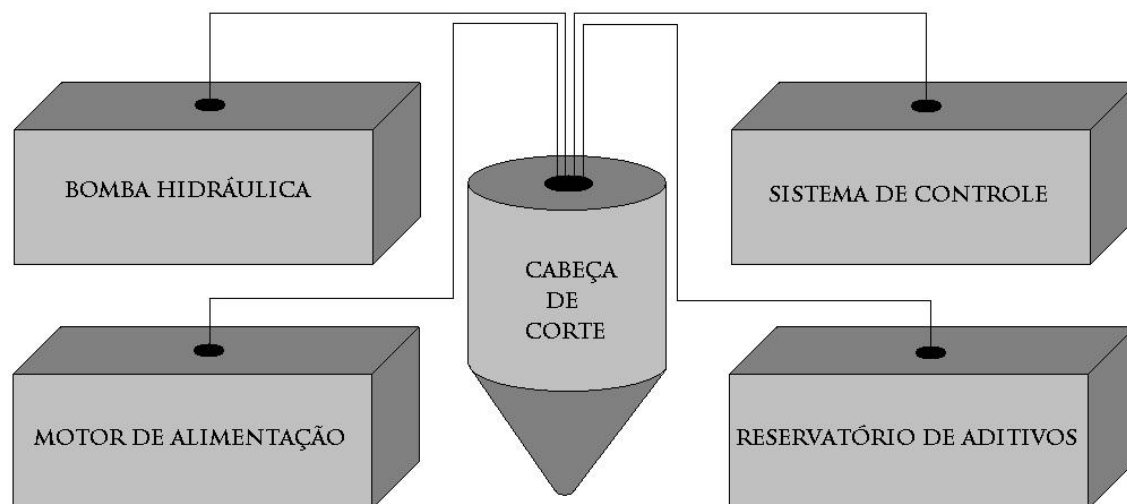
Figura 2.19. Aplicações da tecnologia do jato de água.



Fonte: Momber, 2005.

O princípio de funcionamento do sistema de corte por jato de água é composto por quatro componentes fundamentais, apresentados na Figura 2.20, que permitem a produção de um fluxo de água em alta pressão. São eles: bomba hidráulica, sistema de controle, cabeça de corte e motor de alimentação. Caso exista a necessidade de adição de componentes à água, torna-se necessário um reservatório de aditivos.

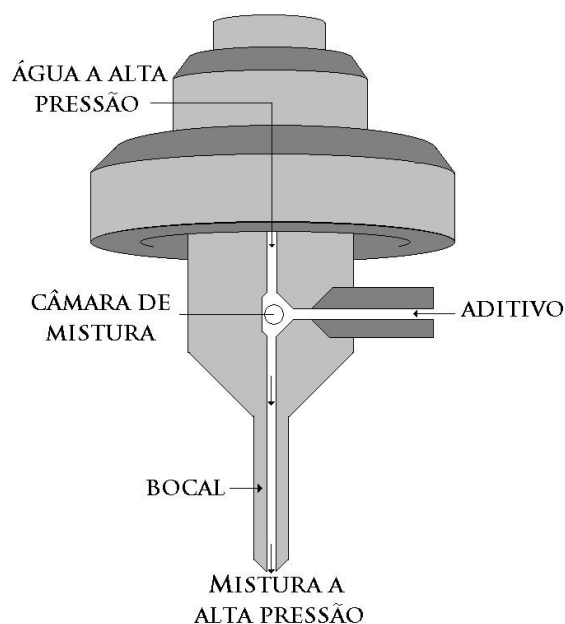
Figura 2.20 - Esquema dos componentes principais do sistema de corte por jato de água.



Fonte: Henriques, 2009.

Dentre os componentes apresentados, o mais importante e que merece destaque no presente estudo é a cabeça de corte. É ela a responsável por direcionar o fluxo de água para o ponto de corte e pela mistura de aditivos na água no caso do uso de jato de água abrasivo. A Figura 2.21 esquematiza uma cabeça de corte com as principais peças que o compõem, este formato pode variar de acordo com cada caso, na tuneladora BraBo, por exemplo existem múltiplos bocais e não um único como mostrado na Figura 2.21.

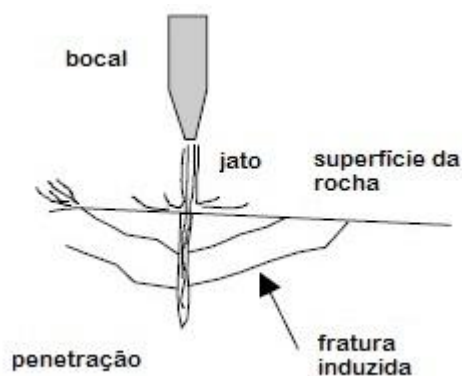
Figura 2.21 -Esquema da cabeça de corte.



Fonte: Henriques , 2009.

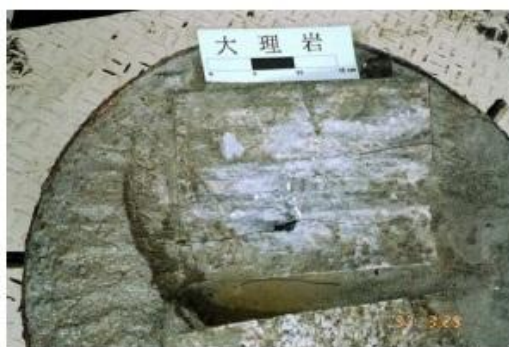
O padrão de fratura da rocha resultante desta técnica foi estudado por Jeng et. al (2004) e, mostrou que, em geral, quando a rocha é fraturada por jato de água, o fenômeno inclui um furo de penetração, fraturas laterais e lascamento da superfície, como se pode observar na Figura 2.22. Quando a rocha é branda, o jato de água pode penetrar a rocha em uma profundidade maior que 30 cm, além disso, produz uma menor superfície de lascamento e raras fissuras laterais, como mostrado na Figura 2.23. Já quando a rocha é dura, meta-arenito por exemplo, o jato de água não consegue penetrar eficientemente na rocha (com penetração menor que 10 cm) e induz a formação de grandes pedaços de lascamento na superfície, como mostrado na Figura 2.24.

Figura 2.22 - Ilustração esquemática da fraturação induzida por jato de água.



Fonte: Jeng et al., 2004.

Figura 2.23 - Fratura induzida no mármore por jato de água.



Fonte: Jeng et. al., 2004.

Figura 2.24 - Fratura induzida no meta-arenito por jato de água



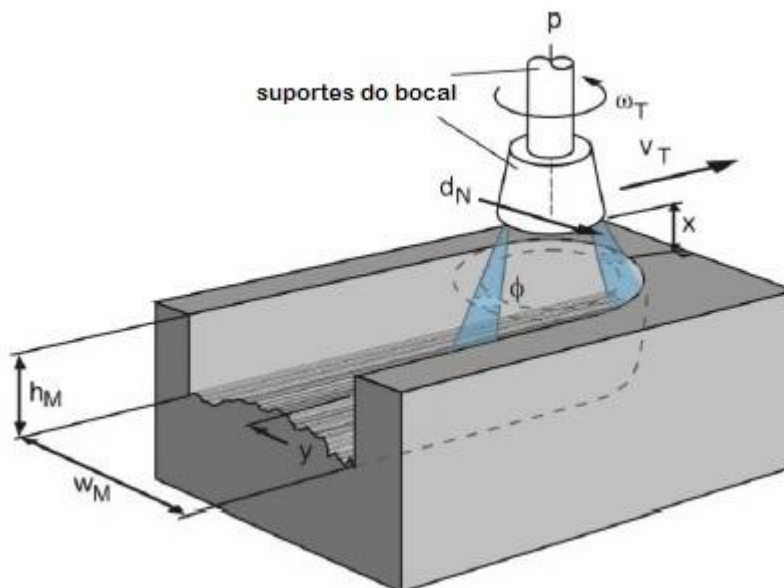
Fonte: Jeng et al., 2004.

Segundo Momber (2005), o uso apropriado da técnica de jatos de água de alta pressão requer um entendimento do mecanismo físico que permite uma

ampla remoção do material. Os parâmetros básicos que influenciam o processo de remoção do material são, segundo o autor, a espessura das camadas removidas (h_M), o volume removido (V_M), a taxa de remoção volumétrica (V_M^*) e a largura de remoção (W_M). Os parâmetros do processo de hidrodemolição são ilustrados na Figura 2.25. Eles podem ser subdivididos em parâmetros hidráulicos e parâmetros de performance.

Os parâmetros hidráulicos, também ilustrados na Figura 2.25 caracterizam o sistema de bocais-bombas e incluem a pressão de operação (p), vazão volumétrica (Q_A) e o diâmetro do bocal do jato de água (d_N). Os parâmetros de desempenho estão mais relacionados com o processo e incluem a distância entre o bocal e a frente de trabalho (x), a velocidade de deslocamento (V_T), o incremento transversal (y), o ângulo de impacto (Φ) e a orientação do bico.

Figura 2.25. Parâmetros do processo de hidrodemolição.



Fonte: Adaptado de Momber, 2005.

Modelos matemáticos e, de forma mais completa, estudos experimentais para medir o desempenho dos jatos de água foram realizados nos últimos 40 anos. O modelo desenvolvido por Momber (2005) permite entender os parâmetros que influenciam essa tecnologia, mas não pode ser aplicado para hidrodemolição em rocha, já que foi desenvolvido exclusivamente para uso em concreto curado.

Ainda em fase de projeto, a empresa BraBo não desenvolveu um modelo específico para o sistema de hidrodemolição com jato de água. A produtividade da tuneladora é medida através de estudos experimentais, como o desenvolvido por Jeng et al. (2004), que realizou ensaios de laboratório e experimentos em campo em diferentes tipos de rocha. A pesquisa realizada sobre o uso de jato de água para fins de tunelamento resultou em uma relação entre a compressibilidade da rocha com a respectiva taxa de remoção. O resultado da pesquisa, que será utilizado no presente estudo, é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso.

Tipo de Rocha	Taxa de Penetração (cm/s)	Taxa de Remoção (m ³ /h)	σ_c (Mpa)	Observações
Arenito	5,00	10,92	35 ~ 75	Rocha Branda
Ardósia	4,50	7,80	45 ~ 55	Rocha Média
Meta-arenito	0,01	0,08	148	Rocha Dura
Granito	0,01	0,04	165	Rocha Dura

Fonte: Adaptado de Jeng et al., 2004.

2.3. Método NTNU

A fim de completar a construção dentro de uma duração razoável e aumentar a segurança durante o processo de escavação, os túneis são geralmente escavados por máquinas tuneladoras (TBM). Portanto, para fins de planejamento e seleção do método de construção, a previsão do desempenho de uma TBM é o requisito principal.

Durante os últimos 30 anos, muitos modelos de previsão têm sido desenvolvidos, eles correlacionam dados geológicos “*in situ*” e de laboratório aos resultados das escavações de túneis, gerando, assim, modelos de previsão de desempenho e de avaliação de custos tanto para escavações com TBM quanto com a metodologia “*drill and blast*”. Atualmente, os modelos mais utilizados incluem o modelo *Colorado School of Mines* (CSM) (Rostami e Ozdemir, 1993; Rostami, 1997) e o modelo do Instituto Norueguês de Tecnologia (NTH) (Bruland, 1998).

O método NTNU tem sido usado nos últimos anos nos principais projetos subterrâneos internacionais, e está ganhando aceitação como um dos métodos mais conhecidos e amplamente utilizados para o teste de

desempenho de TBM's. Os seus modelos são continuamente atualizados e melhorados à medida que novos dados resultantes da construção de túneis se tornam disponíveis. Já foram registrados e armazenados cerca de 3000 amostras referências de rocha e os dados de seus respectivos testes, o que permite possibilidades únicas de correlações, atualizações e novos desenvolvimentos (Dahl, 2006).

O método provisional de perfuração NTNU, anteriormente conhecido como teste NTH, foi desenvolvido na década de 1960 para a avaliação de escavações por percussão. Ao longo dos anos, ele sofreu diversas mudanças e recebeu muitas melhorias. A última versão foi apresentada por Bruland (2000), o qual apresenta o método composto por quatro partes interdependentes para estimar o tempo de consumo e os custos para a escavação do túnel por uma TBM: taxa de penetração (*net penetration rate*) em mm/rev e m/h; durabilidade dos discos de corte (*cutter life*) em h/cortador; taxa de avanço expressa por tempo de consumo como h/km e custos de escavação.

2.3.1. Parâmetros geotécnicos relevantes ao estudo

Para se ter uma estimativa de custos e do planejamento dos projetos de escavação, se faz necessário conhecer um valor provisional da taxa de perfuração da TBM. Este parâmetro depende fundamentalmente da escavabilidade da rocha, ou seja, da taxa com que uma broca penetra no maciço. A escavabilidade de uma rocha não pode ser definida com precisão por apenas uma propriedade mecânica, como resistência à compressão ou tração, mas sim por uma função de diversas características, tais como a composição mineral, textura, tamanho do grão e grau de resistência (Yarali, 2011). Assim, a demanda por estes parâmetros representativos das propriedades das rochas, está aumentando cada vez mais, já que eles constituem o insumo fundamental para a obtenção de estimativas de custos e de tempo mais confiáveis .

O método de previsão de performance NTNU é baseado em testes laboratoriais na rocha para definição dos seus parâmetros de análise. Os índices de escavabilidade deste método, DRI, BWI e CLI, são determinados por meio de índices obtidos a partir de um conjunto de testes, a saber: teste de

britagem “S₂₀”, teste de perfuração “SJ”, teste de abrasão “AV” e o teste de abrasão “AVS”.

O Índice de perfuração (DRI) é avaliado com base nos testes de fragilidade (S₂₀) e no teste de perfuração (SJ) e pode ser descrito como a capacidade da rocha em ser esmagada por impactos repetidos, corrigido por um fator que representa a dureza da superfície. O índice de desgaste dos discos de corte (BWI) é avaliado com base no DRI e no valor de Abrasão (AV). O CLI possibilita desde os anos 1980, a estimativa da durabilidade dos discos de corte em conexão com escavação em rocha por uso de TBM. Ele é avaliado com base no índice SJ e no índice de abrasão medido no disco de corte de aço (AVS).

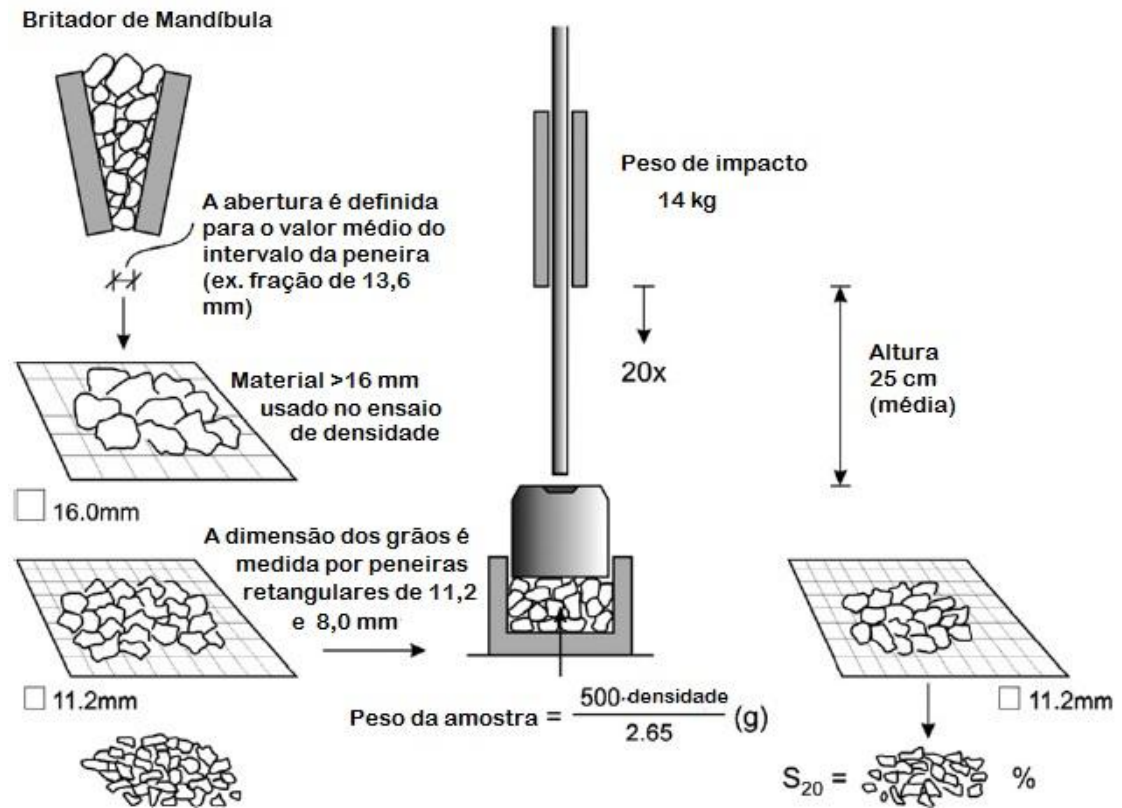
Para Dahl et al. (2011) é essencial para todos os envolvidos no planejamento das escavações subterrâneas obterem uma compreensão adequada de como as diferentes propriedades individuais da rocha podem influenciar a escavabilidade do maciço e, portanto, no tempo e no custo. As classificações são destinadas a agir como uma ajuda importante a esse respeito.

2.3.1.1. Fragilidade da rocha determinada pelo teste de fragmentação (*Drop Test*) (S₂₀)

Existem diferentes métodos utilizados para a determinação da fragilidade da rocha, o utilizado pelo NTNU foi desenvolvido originalmente na Suécia por Matern e Hjelmer em 1943. O ensaio, inicialmente destinado à determinação de propriedades de resistência de agregados, teve várias versões modificadas desenvolvidas. A versão do teste S₂₀ desenvolvido para determinação da escavabilidade da rocha é ilustrada na Figura 2.26.

O valor S₂₀ é determinado pelo uso de um aparelho de impacto e, consiste em uma medida da fragilidade da rocha ou na sua capacidade em ser esmagada por impactos repetidos. O seu valor é definido como a porcentagem de uma fração de rocha pré-peneirada que passa através da peneira com abertura de 11,2 mm depois de ser atingida 20 vezes por um soquete de 14 kg.

Figura 2.26 – Esboço do ensaio de fragilidade.

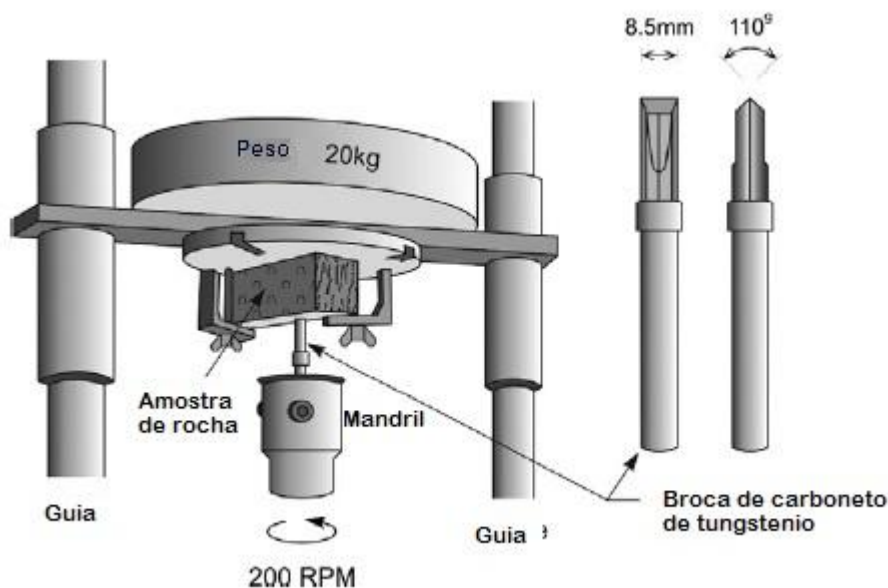


Fonte: Dahl et al., 2011.

2.3.1.2. Dureza da superfície da rocha determinada pelo teste de perfuração (*Sievers' Test*) (SJ)

O teste de perfuração em miniatura Sievers' J foi originalmente desenvolvido por Sievers em 1950. O valor SJ constitui uma medida da dureza da superfície da rocha ou a resistência à penetração e é definido como o valor médio das profundidades de sondagem, medidas em décimos de milímetros, após 200 revoluções da broca miniatura de 8,5 milímetros. O procedimento normal, ilustrado na Figura 2.27 é a utilização de uma superfície de pré-corte da amostra, que é perpendicular à estratificação da rocha, portanto, o SJ é medido paralelamente à estratificação.

Figura 2.27 – Esboço do teste de perfuração em miniatura Sievers' J-Value (SJ).



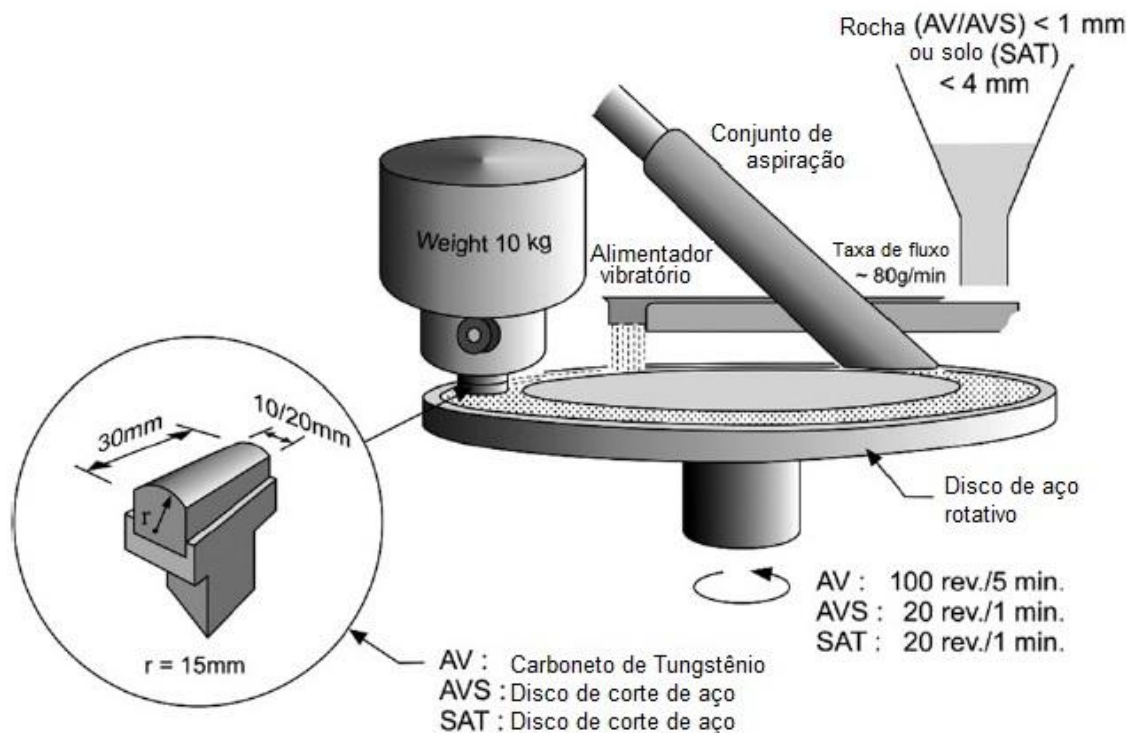
Fonte: Dahl et al., 2011.

2.3.1.3. Abrasão da rocha determinado pelos testes de abrasão (AV) e abrasão do disco de corte de aço (AVS)

O teste AV foi desenvolvido no Departamento de Geologia do NTH no início da década de 1960 e constitui uma medida de abrasão da rocha ou a capacidade de induzir o desgaste em uma amostra de carboneto de tungstênio. O desenvolvimento do teste AVS foi baseado no método de ensaio de AV. O equipamento de teste, ilustrado na Figura 2.28, é igual tanto para as medidas de AV como as de AVS, mas este último usa uma peça de teste de aço retirado de um disco de corte de TBM.

O índice AV é definido como a perda de peso da amostra teste, expressa em miligramas, após 5 minutos de ensaio e, o AVS é definido como a perda de peso do disco em miligramas após 1 minuto de ensaio. A variação de peso encontrada costuma ser baixa e deve, se o ensaio for realizado corretamente, não superar cinco unidades (miligramas de perda de peso). O AV e AVS são o valor médio de 2 a 4 ensaios realizados.

Figura 2.28 – Esboço do teste de abrasão AV e de abrasão em disco de corte AVS.



Fonte: Dahl et al., 2011.

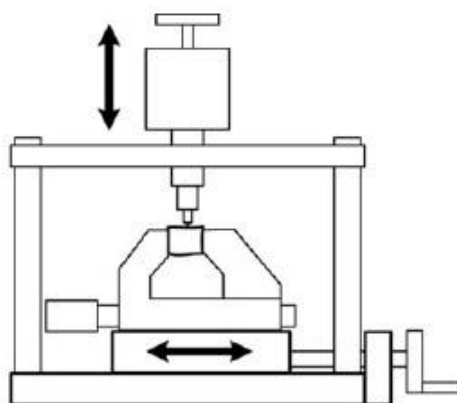
2.3.1.4. Índice de abrasividade CERCHAR (*Cerchar Abrasiveness Index – CAI*)

O teste de abrasividade CERCHAR é um método para determinação do chamado *CERCHAR Abrasivity Index* (CAI), que tem por objetivo classificar a abrasividade dos materiais rochosos. O ensaio foi originalmente desenvolvido pelo *Centre d'Études et Recherches des Charbonnages* (CERCHAR) na França para aplicação em mineração de carvão em 1973 e teve uma versão com projeto modificado apresentada por West em 1989. (Alber et al. 2013)

O teste CERCHAR ilustrado na Figura 2.29 consiste fundamentalmente de uma ponta metálica de dimensões e material específico, sob a carga de 70 N, com a qual se efetua um risco de 10 mm de extensão em um corpo de prova de rocha, em forma de disco ou irregular, verificando-se então o desgaste dessa ponta. O resultado do ensaio, expresso pelo índice CAI, corresponde à medida do diâmetro da área plana da ponta metálica (em décimos de milímetro), oriunda do desgaste.

O sistema de classificação da abrasividade é baseado “na medida” CAI e a classificação resultante é apresentada na Tabela 2.2.

Figura 2.29 – Esboço do teste de abrasão modificado CERCHAR.



Fonte: Alber et al., 2013.

Tabela 2.2 – Classificação da abrasividade de acordo com o índice CAI.

Média CAI	Classificação
0,1 - 0,4	Extremamente baixa
0,5 - 0,9	Muito baixa
1,0 - 1,9	Baixa
2,0 - 2,9	Média
3,0 - 3,9	Alta
4,0 - 4,9	Muito alta
≥ 5	Extremamente alta

Fonte: Adaptado de Alber et al., 2013.

2.3.2. Cálculo previewal

2.3.2.1. Taxa de penetração

A taxa de penetração é o resultado da interação entre as propriedades do maciço e dos parâmetros da máquina tuneladora, ou seja, especificações técnicas da mesma. Os parâmetros necessários para prever a penetração em mm/rev estão separados em parâmetros geológicos e parâmetros da máquina, como apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Parâmetros do maciço rochoso e da tuneladora considerados no modelo da taxa de penetração.

Parâmetros do Maciço Rochoso	Parâmetros da Tuneladora
Frequência e orientação do fraturamento	Média de impulso de corte
Índice de perfuração (DRI)	Espaçamento entre discos de corte
Porosidade	Diâmetro do disco de corte

Fonte: Adaptado de Bruland, 2000.

O fraturamento do maciço rochoso é expresso pelo fator k_s , que é composto pelo grau de fraturamento ou, pela média de espaçamentos entre planos de fraqueza, e também pelo ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza. Em maciços rochosos muito duros, o grau de fraturamento é o fator geológico que mais influencia a taxa de penetração e, conseqüentemente, nos custos de escavação.

O índice de perfuração (DRI – *Drilling Rate Index*) representa a facilidade com que a rocha intacta é perfurada e leva em consideração a dureza da face da rocha, medida pelo índice SJ , e a fragilidade do maciço, S_{20} , medida como a energia necessária para quebrar a rocha.

A influência da porosidade é explicada pelos poros que agem como iniciadores e amplificadores da propagação das fraturas. Apesar deste fenômeno ser considerado nos testes DRI da rocha, o efeito da porosidade sobre a DRI não é suficientemente grande em comparação com o efeito sobre a taxa de penetração. Assim, se faz necessário a inclusão de um fator de correção separado para a porosidade da rocha.

Com relação aos parâmetros da tuneladora, o impulso médio de corte é o principal. Isto é explicado pelo fato de que com o aumento da carga, as bordas dos discos de corte penetrarão mais profundamente na superfície da rocha e, conseqüentemente, transmitirão a energia de forma mais eficiente da cabeça de corte para a rocha. O impulso médio de corte é obtido dividindo-se o impulso total pelo número de discos presentes na cabeça de corte.

O modelo NTNU utiliza o espaçamento médio entre os discos posicionados na cabeça de corte, o que significa que o diâmetro da fresa é dividido pelo número de discos de corte.

O diâmetro do disco influencia diretamente na área de contato sob a borda do disco de corte e, portanto, na reentrância do disco para uma determinada carga de corte, sendo considerado no fator de correção do diâmetro.

2.3.2.2. Durabilidade dos discos de corte

O desgaste dos discos, ou melhor, o modelo de durabilidade dos discos de corte é baseado no tempo de abrasão a que os mesmos são expostos. O modelo é fundamentado em dados de campo e amostras de rocha correspondentes testadas em laboratório. A durabilidade dos discos é dada em h/corte o que equivale ao tempo de corte em uma distância percorrida (km/corte) para uma dada revolução da cabeça de corte.

Os parâmetros de entrada para prever a vida útil do cortador em h/corte são separados em parâmetros geológicos e da máquina, como apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Parâmetros do maciço rochoso e da tuneladora considerados no modelo de durabilidade do disco.

Parâmetros do Maciço Rochoso	Parâmetros da Tuneladora
Índice de durabilidade (CLI)	Número de discos de corte na cabeça de corte
	Diâmetro do disco de corte
Teor de quartzo (%)	Diâmetro da tuneladora
	Rotações por minuto da cabeça de corte

Fonte: Adaptado de Bruland, 2000.

O índice de durabilidade (*CLI – Cutter Life Index*), expressa a propriedade de abrasão da rocha triturada e da face rochosa do túnel, sendo considerado o parâmetro que representa o processo abrasivo sofrido pelo disco de corte. O CLI é medido pelos valores AVS e SJ, que expressam, respectivamente, o quão rápido os pedaços de rocha desgastam o disco e em que lugar do disco a abrasão ocorrerá.

O conteúdo de quartzo da rocha tem sido utilizado para incluir um fator de correção no modelo. Isto se tornou necessário uma vez que diferentes tipos de rocha com o mesmo conteúdo de quartzo mostraram diferentes relações entre a CLI e durabilidade dos discos. A causa mais provável encontrada foi uma diferença na forma como os outros minerais da rocha triturada agem contra o anel de corte e a peça de teste de laboratório. As condições embaixo de um anel de corte são caracterizadas como muito mais dinâmicas e com um nível de estresse mais elevado do que as condições em que a peça está submetida em um teste de laboratório.

Apesar da experiência de campo mostrar que o fraturamento do maciço rochoso influencia no desgaste dos discos, o modelo não inclui um parâmetro específico para esse critério. Porém, já que o método está baseado inteiramente em dados de campo, as fraturas reais da rocha são consideradas na durabilidade dos discos de corte.

Com relação aos parâmetros da máquina, o diâmetro dos discos de corte é o principal, pois um aumento do diâmetro significa uma maior superfície de aço para sofrer abrasão antes de o disco ser substituído.

Existe também uma correção para o número de discos de corte, já que, para uma determinada taxa de penetração, a quantidade de rocha triturada que flui por segundo através de um disco de corte é menor para a máquina com o

maior número de cortadores. Assim o modelo estima uma taxa de penetração mais elevada para a máquina com o maior número de discos de corte.

Uma tuneladora com maior diâmetro possui um valor de durabilidade dos discos de corte mais elevado. Isso ocorre pois, com o aumento do diâmetro, aumenta a razão entre os discos de corte da face, que possuem condições de trabalho mais favoráveis, e os discos periféricos e centrais.

O fator de correção para a rotação da cabeça de corte é explicado pela velocidade angular dos discos de corte, ou pelo comprimento da trajetória percorrida por segundo. O aumento desses dois fatores possui um efeito inversamente proporcional sobre a durabilidade dos discos de corte em h/corte.

2.3.2.3. Taxa de avanço

A taxa de avanço é medida em m/dia, m/semana, ou similar, e é calculada pela porcentagem de utilização da máquina e pela taxa de penetração em m/h. O modelo é baseado em dados médios sobre o comprimento total do túnel.

A estimativa de utilização da máquina baseia-se em uma aproximação do consumo de tempo em h/km para várias operações necessárias a escavação do túnel, sendo este determinado como tempo operacional.

Os parâmetros geológicos e da máquina estão indiretamente incluídos no modelo através dos valores de taxa de penetração e de durabilidade do disco de corte. É difícil identificar a influência de cada um deles, mas em geral pode-se dizer que o aumento da taxa de penetração reduz a utilização da máquina, assim como reduz a vida útil dos discos.

A quantidade de tempo necessária para que um disco seja consumido e tenha que ser substituído é de extrema importância no cálculo do consumo de tempo necessário para se efetuar as trocas dos discos de corte. Na prática, devem ser substituídos o maior número possível de discos de corte a cada parada, de forma que a influência sobre o tempo fixado para manutenção do equipamento seja menor. A troca de um maior número de discos por parada da máquina acontece mais facilmente em tuneladoras de maior diâmetro.

2.3.2.4. Custos de escavação

O conceito básico do modelo de custo é baseado em estimativas detalhadas de todos os gastos incluídos no processo direto de escavação, o que não inclui despesas com sistema de suporte da rocha. Os preços variam bastante de acordo com cada contrato e quais operações da construção do túnel cada um deles inclui. As estimativas detalhadas são baseadas no consumo dos recursos de entrada (como por exemplo, depreciação, peças de reposição, materiais de consumo) e no preço dos mesmos.

O modelo de custo é diretamente baseado e relacionado aos modelos de taxa de penetração, durabilidade dos discos de corte e taxa de avanço, assim, com o aumento de tais parâmetros há uma diminuição dos custos de escavação.

Segundo Castro (2013), o modelo NTNU apresenta um bom desempenho na estimativa da performance de tuneladoras em campo, pois leva em consideração parâmetros relevantes na interação maciço-tuneladora. Porém, como qualquer modelo, ele ainda precisa de aperfeiçoamentos, passando a considerar outros parâmetros de interação da máquina com o maciço, tais como a fricção da cabeça de corte e o sistema de instalação de suporte adotado na tuneladora. A deformabilidade do maciço e as tensões padrão também são fatores importantes, pois influenciam diretamente na performance da máquina em campo.

3. Resultados e análises

No presente trabalho será feito um exame da produtividade de duas máquinas tuneladoras para a escavação de um túnel de adução de 4,291 metros de diâmetro e 5000 metros de extensão, a fim de analisar a performance das TBMs com dois métodos distintos. O maciço a ser escavado apresenta características de rocha dura e abrasiva, com características determinadas a partir de poucas sondagens de exploração. Tal situação é muito comum em licitações para elaboração de projetos básicos para túneis, em que se dispõe de dados preliminares do maciço e deseja-se fazer um orçamento de custo da obra.

Os parâmetros de análise a serem encontrados para a previsão do desempenho das máquinas são a taxa de penetração, durabilidade dos elementos de corte, taxa de avanço e custos de escavação. A produtividade calculada para cada máquina leva em consideração apenas o desempenho do sistema de corte, não sendo incluído neste cálculo o sistema de suporte.

As máquinas analisadas são uma TBM aberta com sistema de escavação baseado nos discos de corte e uma tuneladora BraBo, com sistema de escavação baseado em jatos de água. Ambas tuneladoras apresentam seus componentes dimensionados pelas características do túnel a ser escavado.

A metodologia utilizada para a análise de produtividade das tuneladoras é a última versão do método do Instituto Norueguês NTNU, elaborado por Amund Bruland, para a TBM tradicional e um método simplificado de performance utilizado pela empresa BraBo, baseado nos estudos experimentais de Jeng et. al (2004).

3.1. Dados geológicos e geomecânicos utilizados

Para fins de ilustração dos modelos adotados no método, foram utilizados dados geológicos e geomecânicos de um caso hipotético. Os parâmetros são resultados de provas específicas em amostras retiradas de 3 sondagens explorativas. Os resultados dos ensaios de abrasividade e geomecânicos a se considerar na fase de previsão são apresentados a seguir.

As características da rocha determinadas experimentalmente e significativas para o presente estudo, endereçados a determinação da escavabilidade do maciço rochoso são:

- Resistência à compressão monoaxial, σ_c ;

- Índice S_{20} , determinado do Teste de Fragmentação (*Drop Test*);
- Índice SJ, determinado do Teste de Perfuração do NTNU (*Sievers' Test*);
- Índice CAI (*Cechar Abrasivity Index*);
- Conteúdo de quartzo da rocha, determinado por análise microscópica.

Os dados obtidos estão resumidos nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, apresentadas a seguir.

Tabela 3.1. – Valores de CAI, S_{20} e SJ.

Sondagem	CAI (1/10mm)	S_{20} (%)	SJ (1/10mm)
1	4,5	27,16	8,6
			5,81
			29,6
			1,74
2	3	42,9	34,15
			7,28
			0,63
			13,4
3	3,88	49,5	30,4
			22,25
			3,95
			7,9
Media	3,88	39,9	13,8

Fonte: Autor.

Tabela 3.2. – Valores de resistência à compressão monoaxial e módulo elástico.

Sondagem	σ_c (Mpa)	E_s [GPa]	E_t [GPa]
2	79,85	42,03	40,44
3	46,83	11,29	23,41

Fonte: Autor

Tabela 3.3. – Valores do conteúdo de quartzo encontrados na análise microscópica.

Sondagem	Quartzo (%)
3	40-45

Fonte: Autor.

Os ensaios realizados para determinação dos parâmetros de desgaste foram descritos no item 2.3.1.

Para execução das três provas CAI disponíveis foram executadas 4 determinações por amostra com uma média aritmética de 3,88. Com base nos valores do índice CAI, a rocha pode ser classificada como altamente abrasiva.

As três provas de fragmentação fornecem valores de S_{20} entre 27 e 50%, com uma média de 39,9%. Este resultado indica uma boa desintegração da rocha quando submetida a uma ação mecânica.

No que diz respeito aos resultados da prova de perfuração (índice SJ), estes são muito influenciados pela mineralogia das amostras submetidas aos ensaios. Nos níveis indicados como micáceos (4 determinações), os valores de SJ oscilam entre 22,25 e 34,15 mm/10 com uma média de 29 mm/10 enquanto nas porções descritas como quartzosas (2 determinações), os valores de SJ estão entre 0,63 e 1,74 mm/10, com uma média de 1,2 mm/10. Considerando todas as determinações efetuadas, se obtém um valor médio de SJ próximo a 13,8 mm/10. Globalmente, o andamento das provas de perfuração evidencia que, quando a escavação é feita na rocha mais quartzosa, a penetração é reduzida enquanto que se torna mais alta quando há um maior conteúdo de mica.

No projeto de prestação de serviço das tuneladoras, decidiu-se levar em consideração os valores médios de tais parâmetros, visto que se trata de um projeto preliminar. Além disso, não foram encontrados valores muito discordantes utilizando os máximos e mínimos dos índices SJ e S_{20} (no método NTNU), dos valores medianos seja para o desgaste dos discos seja para a taxa de avançamento.

Ao longo do traçado, a natureza da rocha é pouco variável (rocha metamórfica de granulometria média, xistosidade e foliação da rocha acentuada). Em alguns locais, o xisto dá lugar ao gneiss, rocha mais compacta e menos foliada. Ambos litotipos são atravessados por veios de quartzo de espessura variável entre 2 e 5 centímetros. A inclinação dos bancos é muito constante: a sua direção é de N15°E (formando um ângulo de 5° com o eixo do túnel que aumenta progressivamente a 15° durante as últimas dezenas de metros do traçado) com inclinação sub-vertical ($\pm 15^\circ$). O furo de sondagem 2 demonstrou uma tendência marcada ao desagregamento. A fraturação (diacrise) é descrita na documentação disponível como muito desenvolvida (porém sem indicações precisas), e geralmente associada a sistemas mais ou

menos ortogonais à foliação, sub-horizontal e perpendicular ao eixo de projeção.

Em resumo pode-se considerar que o arranjo da xistosidade seja sub-vertical ($\pm 15^\circ$), com direção paralela a direção do túnel, enquanto seu espaçamento é extremamente próximo (5-15 cm) como evidenciado nas análises das amostras de sondagem.

Nas sondagens também evidenciou-se uma falha de descontinuidade além da xistosidade, com inclinação entre 30 e 40°, disposição ortogonal a xistosidade e espaçamento variável entre 0,5 e 2 metros.

Na Tabela 3.4 estão mostrados os dados geométricos relativos às descontinuidades.

Tabela 3.4. – Dados geométricos relativos às descontinuidades.

	Xistosidade	Falha
Espaçamento (cm)	5 -15	50 – 200
α_F (°)	15	35 (30 - 40)
α_T (°)	0	90
α_S (°)	15	105

Fonte: Autor.

Onde, α_S = ângulo de orientação

α_f = ângulo de mergulho

α_t = direção do túnel

A orientação dos planos de fraqueza é determinada a partir de medições da direção e do mergulho. O ângulo de orientação (α_S) representa a direção, que é definida pelo ângulo que a intersecção do plano da descontinuidade, com plano horizontal, faz com a direção norte. O ângulo de mergulho (α_f) é o ângulo de inclinação do plano com o plano horizontal. A reta do mergulho é a reta de máxima inclinação no plano, perpendicular à direção. O ângulo α_t representa o ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza.

3.2. Cálculo preliminar

3.2.1. Definição dos parâmetros das tuneladoras

A TBM tradicional utilizada como parâmetro de comparação possui um diâmetro de 4,291 metros, valor definido pela geometria desejada para a obra. A quantidade de discos na cabeça de corte, o diâmetro dos discos e a força suportada por cada disco são determinados a partir dos gráficos elaborados pelo NTNU.

A determinação dos parâmetros da tuneladora através de modelos teóricos baseados em dados de experiências de campo é muito comum na fase inicial do projeto, visto que as TBMs são máquinas praticamente artesanais construídas e dimensionadas de acordo com as condições da obra em que ela será utilizada.

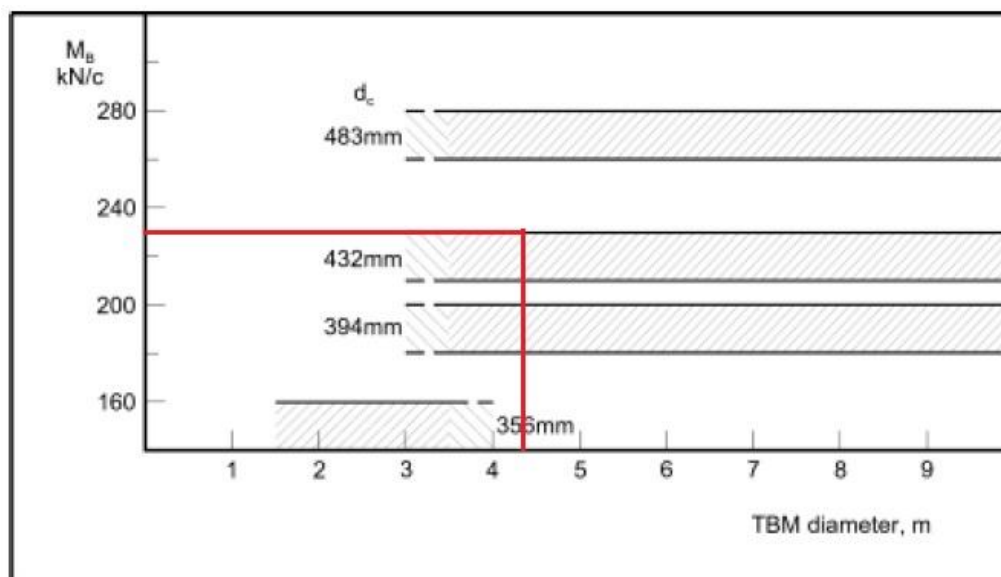
O primeiro parâmetro da tuneladora necessário para estimar a taxa de penetração e a durabilidade dos discos de corte pelo método NTNU é o diâmetro dos discos de corte. Geralmente este parâmetro é definido pelo valor desejado de carga suportada pela cabeça de corte.

Atualmente o diâmetro mais utilizado para aplicações em rocha dura é o de 483 mm. Para o presente estudo adotou-se o diâmetro do disco de corte de 432 mm (17"), um pouco menor que o diâmetro normalmente utilizado em escavações com rochas duras, pois julgou-se esta dimensão mais adequada, baseado no tamanho da TBM em questão.

O impulso por disco de corte é o segundo parâmetro a ser definido e significa o impulso que os discos são capazes de utilizar durante um período de tempo, sem que ocorram picos de carga. Atualmente, a qualidade do material do anel de aço é o fator limitante do impulso de corte.

A Figura 3.1 mostra a média do máximo impulso bruto por disco de corte como uma função do diâmetro do disco e da TBM. O limite superior indica escavação em maciço rochoso homogêneo e o inferior, escavação em maciço rochoso muito fraturado.

Figura 3.1 – Máximo impulso bruto por disco recomendado.



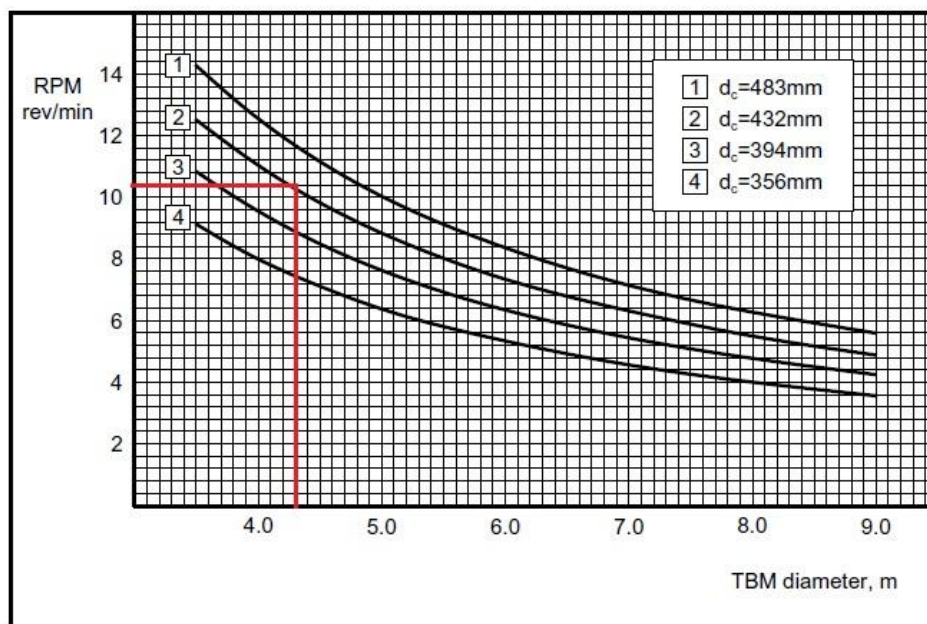
Fonte: Bruland, 2000.

O impulso máximo de corte encontrado para o diâmetro do disco de 432 mm foi de 228 kN por disco, já que o maciço deste estudo é considerado homogêneo.

O terceiro parâmetro a ser considerado é a velocidade de rotação da cabeça de corte, que é inversamente proporcional ao seu diâmetro, isto porque é preciso limitar a velocidade de rotação dos discos periféricos. A Figura 3.2 mostra a velocidade de rotação da cabeça de corte em função do diâmetro da TBM e dos discos de corte.

A velocidade encontrada, levando em consideração o diâmetro da TBM e dos discos de corte do presente estudo foi ligeiramente superior a 10 rpm. Esta é uma indicação da possível velocidade que a cabeça de corte pode alcançar, algumas vezes é necessário limitar este valor para diminuir as vibrações e possíveis recalques.

Figura 3.2 – Velocidade de rotação da cabeça de corte.

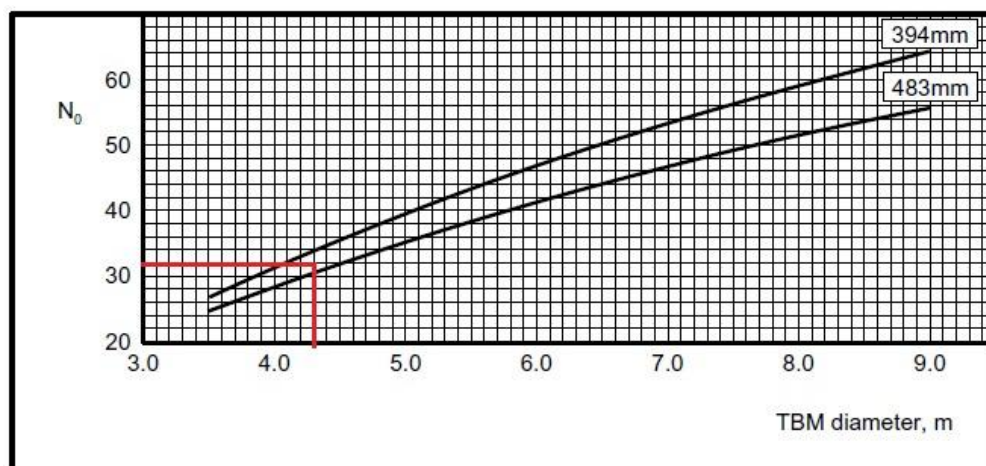


Fonte: Bruland, 2000.

Através da Figura 3.3 se define o número padrão de discos na cabeça de corte em função do diâmetro dos discos e da TBM. Para TBM de pequeno diâmetro, o espaço disponível na cabeça de corte é limitado e o número de discos de corte indicado é máximo, já para TBM maiores este número pode ser aumentado em comparação com o mostrado na Figura 3.3.

Considerando que a curva do diâmetro 432 mm estaria entre as duas curvas mostradas no gráfico, encontrou-se um número de discos de corte igual a 32. Como o diâmetro da TBM é considerado pequeno este número de discos já é máximo.

Figura 3.3 – Quantidade normal de discos na cabeça de corte.



Fonte: Bruland, 2000.

Na Tabela 3.5 é apresentado um resumo dos parâmetros da TBM definidos.

Tabela 3.5. – Características definidas para a TBM.

Características da TBM	
Diâmetro da TBM (m)	4,29
Diâmetro dos discos de corte (mm)	432,00
Impulso por disco de corte (kN por disco)	228,00
Velocidade de rotação (rpm)	10,00
Número de discos de corte (un.)	32,00

Fonte: Autor.

O principal parâmetro para a análise de produtividade da TBM BraBo é o número de bocais de jatos de água. A tuneladora, em fase de projeto, possui originalmente um diâmetro de 3 metros e 6 bocais de jato de água posicionados equidistantemente ao longo da circunferência externa de 15 cm de espessura. Para o presente estudo esta geometria foi adaptada para o diâmetro de 4,291 m, requeridos pela obra, e o número de bocais aumentado proporcionalmente para 8.

3.2.2. Taxa de penetração

Segundo o modelo NTNU, a Taxa de Penetração (i_0) é uma função da taxa de penetração básica e da velocidade da cabeça de corte. A velocidade de rotação da cabeça de corte, encontrada na estimativa de parâmetros da TBM tradicional, foi de 10 rpm. Já para o cálculo da taxa de penetração básica i_0 , deverão ser considerados os fatores, tanto geológicos como da máquina, que influenciam esta taxa, como apresentado no item 2.3.2.1.

Para cada parâmetro do maciço rochoso e da tuneladora considerados no modelo da taxa de penetração, existe um fator de correção. Eles são calculados através de gráficos que baseiam-se no banco de dados com resultados de ensaios de mais de 3000 amostras do NTNU. A seguir são calculados todos os fatores de correção necessários para a obtenção da taxa de penetração.

O primeiro fator de correção diz respeito à fraturação do maciço rochoso e é expresso pelo fator de fraturação κ_s . O valor de κ_s é dependente do grau de fraturação (tipo e espaçamento), e do ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza, α .

O grau de fraturamento de um maciço rochoso é dividido em classes para facilitar a classificação durante o mapeamento. As classes incluem tanto os tipos de planos, como a distância entre os planos de fraqueza, como apresentado na Tabela 3.6. Assim, utilizando o valor médio dos espaçamentos, encontrou-se a Classe III para a xistosidade e I para a falha.

Tabela 3.6 – Classes de fratura com distância entre os planos de fraqueza.

Classe de Fratura (Juntas = Sp / Fissura = St)	Distância entre os Planos de Fraqueza (cm)
0	-
0-I	160
I-	80
I	40
II	20
III	10
IV	5

Fonte: Bruland, 2000.

Para definição do fator de correção κ_s são necessárias as classes de fratura, definidas acima, e o ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza, α , definido a seguir através da Equação 1 e dos dados apresentados no item 3.1, na Tabela 3.4.

$$\alpha = \arcsin (\sin \alpha_f \cdot \sin (\alpha_t - \alpha_s)) \quad (1)$$

onde, α_s = ângulo de orientação

α_f = ângulo de mergulho

α_t = direção do túnel

O resultado encontrado foi:

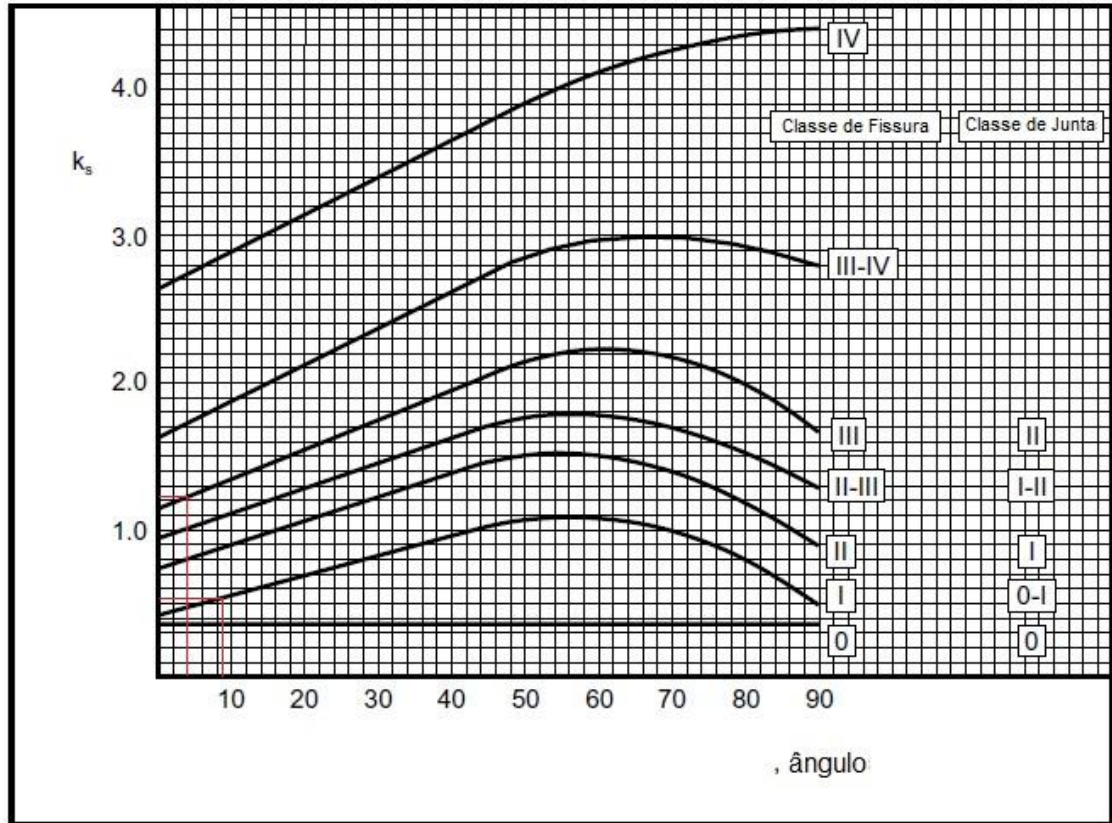
Tabela 3.7 – Ângulo entre o eixo do túnel e os planos de fraqueza

	Xistosidade	Falha
α (°)	3,84	8,54

Fonte: Autor.

A Figura 3.4 mostra o fator de fraturamento do maciço rochoso k_s . Inserindo-se os ângulos α e as classes de fratura definidas anteriormente, encontrou-se o valor de k_s para cada tipo de descontinuidade.

Figura 3.4 – Fator de fraturamento.



Fonte: Bruland, 2000.

O valor de k_s encontrado para a xistosidade foi de 1,21 e para a falha de 0,52. Como existem dois planos de fraqueza, é necessário utilizar a Equação 2 para encontrar o valor de k_{s-tot} .

$$k_{s-tot} = \sum_{i=1}^n k_{si} - (n-1) \cdot 0.36 \quad (2)$$

onde, k_{s-tot} = Fator de fraturação total

k_{si} = Fator de fraturação para o conjunto i

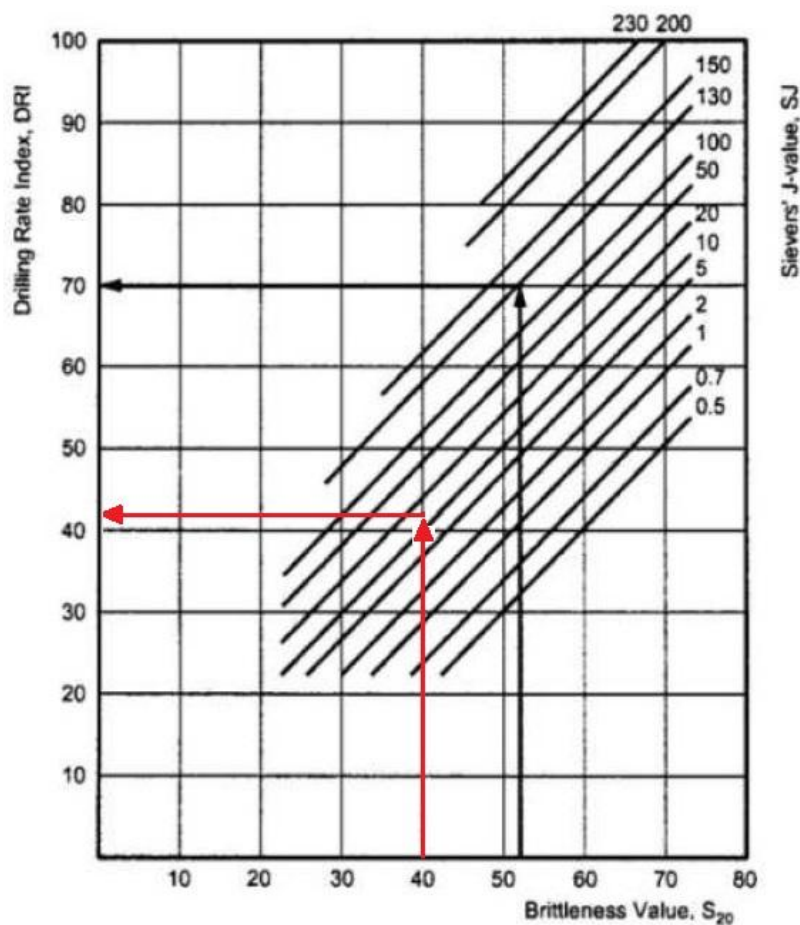
n = Número de conjuntos de fraturação

O valor encontrado foi $k_{s-tot} = 1,37$.

O segundo fator de correção deve ser feito quando o índice de perfuração (DRI – *Drilling Rate Index*) é diferente do valor 50. Como este índice

não é um dado conhecido, o mesmo foi estimado a partir dos índices fornecidos S_{20} e SJ, através do gráfico da Figura 3.5.

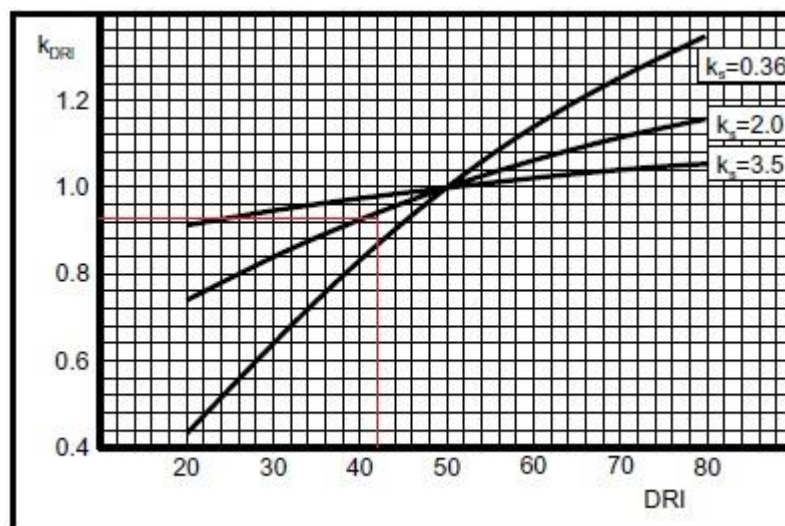
Figura 3.5 – Gráfico correlacionando os índices S_{20} e SJ ao índice de perfuração DRI.



Fonte: Bruland, 2000.

O valor do Índice DRI resultou próximo a 42 e, portanto, é necessário o cálculo do fator de correção mediante o gráfico da Figura 3.6. O fator k_{DRI} obtido, utilizando-se os valores de DRI e k_s calculados anteriormente foi próximo a 0,9.

Figura 3.6 – Fator de correção para valores de DRI≠50.

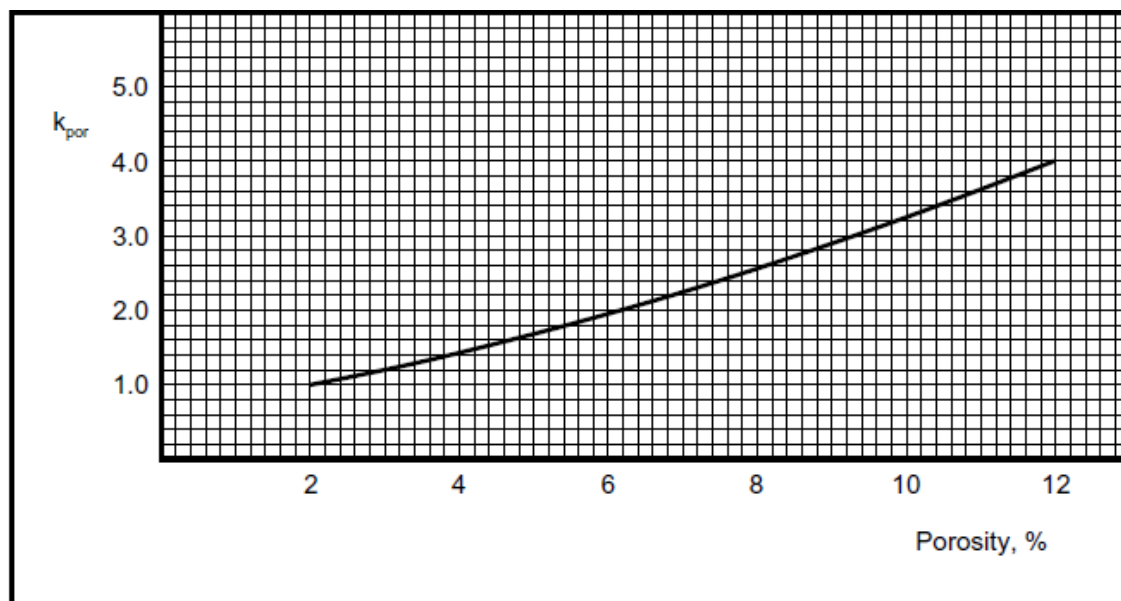


Fonte: Bruland, 2000.

Com relação à estimativa de parâmetros, o próprio instituto NTNU, sabendo que uma das desvantagens de seu modelo é a grande quantidade de ensaios específicos em rocha, elaborou alguns gráficos correlacionando dados. Tais gráficos relacionam o resultado dos ensaios de seu banco de amostras com alguns parâmetros tais como compressão monoaxial, índice S_J e S_{20} , e permitem assim, estimar outros índices como DRI, BWI e CLI.

O terceiro fator de correção a ser considerado para o maciço rochoso é a porosidade. Uma estimativa de sua influência na taxa de penetração é mostrada na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Influência da porosidade no fator de fraturação equivalente.



Fonte: Bruland, 2000.

Sendo o micaxisto uma rocha metamórfica, sua porosidade é geralmente muita baixa e este fator de correção pode ser negligenciado.

Calculados os fatores de correção relacionados ao maciço rochoso pode-se calcular o fator de correção equivalente k_{eqv} através da Equação 3, que será aplicado posteriormente no cálculo da taxa de penetração. A Tabela 3.8 apresenta um resumo dos fatores de correção obtidos até o momento.

Tabela 3.8 – Fatores de correção relacionados ao maciço rochoso.

k_{s-tot}	1,74
k_{DRI}	0,9
k_{por}	1,00

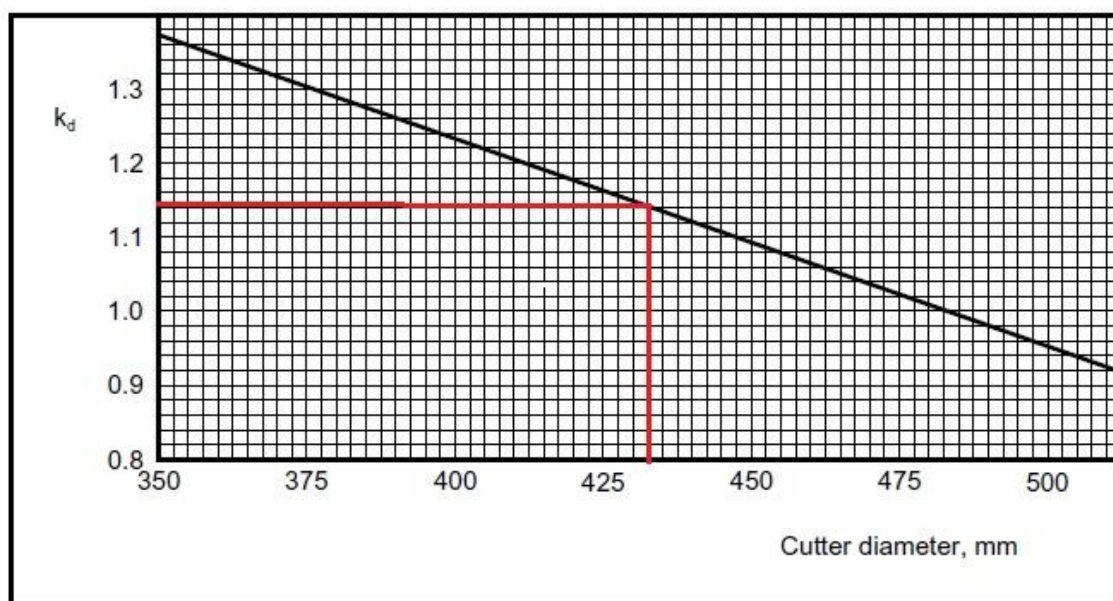
Fonte: Autor.

$$k_{eqv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \cdot k_{por} \quad (3)$$

O resultado encontrado foi $k_{eqv} = 1,57$.

O primeiro fator de correção relacionado à máquina, diz respeito ao diâmetro dos discos de corte. Ele só é necessário quando o diâmetro difere de 483 mm, o que ocorre no estudo em questão, já que adotou-se um disco de 432 mm. O valor encontrado através da Figura 3.8 para o fator de correção k_d foi de 1,14.

Figura 3.8 – Fator de correção para $d_c \neq 283$.



Fonte: Bruland, 2000.

O segundo fator de correção diz respeito ao espaçamento entre discos. Quando este valor é diferente de 70 mm deve-se adicionar um fator de correção κ_a . Este fator não foi levado em consideração tendo em vista que o espaçamento entre discos não é diferente de 70 mm.

Encontrados os fatores de correção para o diâmetro e o espaçamento dos discos de corte pode-se definir o parâmetro principal no que diz respeito a tuneladora: o impulso.

O impulso equivalente é obtido multiplicando-se o impulso por disco de corte encontrado no item 3.2.1 ($M_B = 228$ kN por disco) pelos fatores de correção κ_d e κ_a , como mostrado na Equação 4. O valor encontrado para o impulso equivalente foi de $M_{ekv} = 260$ kN por disco.

$$M_{ekv} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \quad (4)$$

As Tabelas 3.9 e 3.10 apresentam um resumo dos fatores de correção calculados até esta etapa.

Tabela 3.9 – Resumo dos fatores de correção para o maciço rochoso.

Parâmetros do Maciço Rochoso	Fator de correção correspondente
Frequência e orientação do fraturamento	$k_{s-tot} = 1,74$
Índice de perfuração (DRI)	$k_{DRI} = 0,90$
Porosidade	$K_{por} = 1,00$
Fator de correção equivalente	$\kappa_{eqv} = 1,57$

Fonte: Autor.

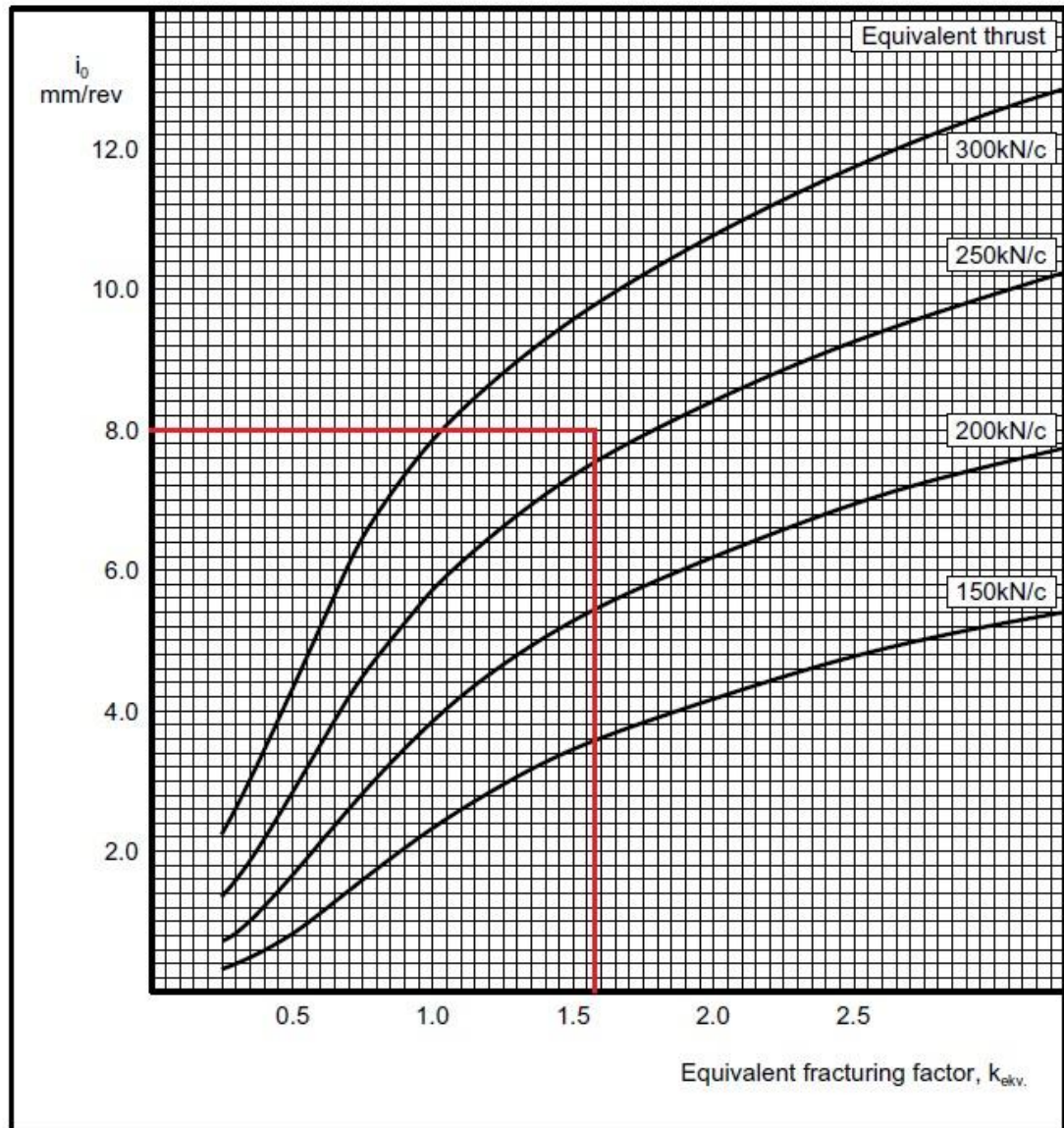
Tabela 3.10 – Resumo dos fatores de correção para a tuneladora.

Parâmetros da Tuneladora	Fator de correção correspondente
Diâmetro do disco de corte	$\kappa_d = 1,14$
Espaçamento entre discos de corte	$\kappa_a = 1,00$
Média de impulso de corte	$M_{ekv} = 260$ kN/disco

Fonte: Autor.

Calculados todos os fatores de correção é possível definir a taxa de penetração básica, entrando com os valores de κ_{eqv} e M_{ekv} no gráfico da Figura 3.9. O valor encontrado foi $i_o = 8 \text{ mm/rev}$.

Figura 3.9 – Penetração básica para $d_c = 483 \text{ mm}$ e $a_c = 70 \text{ mm}$.



Fonte: Bruland, 2000.

Por fim é possível calcular a Taxa de Penetração I_o , que é uma função da taxa de penetração básica e da velocidade da cabeça de corte. Com esses dados é possível encontrar a Taxa de Penetração através da Equação 5.

$$I_o = i_o \cdot RPM \cdot \left(\frac{60}{1000} \right) \quad (5)$$

Utilizando a penetração básica $i_o = 8$ mm/rev e a velocidade de rotação de 10 rpm, encontrou-se a Taxa de Penetração 4,80 m/h.

A taxa de penetração para a TBM BraBo, que utiliza o sistema de corte de jato de água, foi obtida a partir dos estudos experimentais realizados por Jeng et. al (2004). No cálculo, levou-se em consideração o maior valor de compressão monoaxial apresentado no item 3.1 ($\sigma_c = 79,85$ MPa). Escolheu-se adotar o valor máximo de resistência ao invés do valor médio, pois a rocha analisada no presente estudo não é a mesma utilizada nos experimentos feitos por Jeng et. al (2004). Sendo assim, optou-se pela opção mais cautelosa.

Para a definição da taxa de remoção volumétrica através da Tabela 3.11, como valor resistência adotado é maior que o apresentado para rochas médias e menor que o de rochas duras, interpolou-se o valor de σ_c do estudo com os apresentados por Jeng et. al (2004).

Tabela 3.11 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso.

Tipo de Rocha	Taxa de Penetração (cm/s)	Taxa de Remoção (m³/h)	σ_c (Mpa)	Observações
Arenito	5,00	10,92	35 ~ 75	Rocha Branda
Ardósia	4,50	7,80	45 ~ 55	Rocha Média
Meta-arenito	0,01	0,08	148	Rocha Dura
Granito	0,01	0,04	165	Rocha Dura

Fonte: Adaptado de Jeng et. al, 2004.

A taxa de remoção volumétrica encontrada na interpolação foi de 4,39 m³/h e corresponde ao desempenho de um jato de água. Como na geometria da TBM em questão existem 8 bocais de jatos de água, o volume escavado por hora é igual a 35,1 m³/h.

Para a definição da taxa de penetração dividiu-se a taxa de remoção volumétrica pela área anular correspondente à escavação através dos jatos de água. O valor encontrado foi de 13,66 m/h. A Tabela 3.12 apresenta um resumo dos principais parâmetros utilizados neste cálculo.

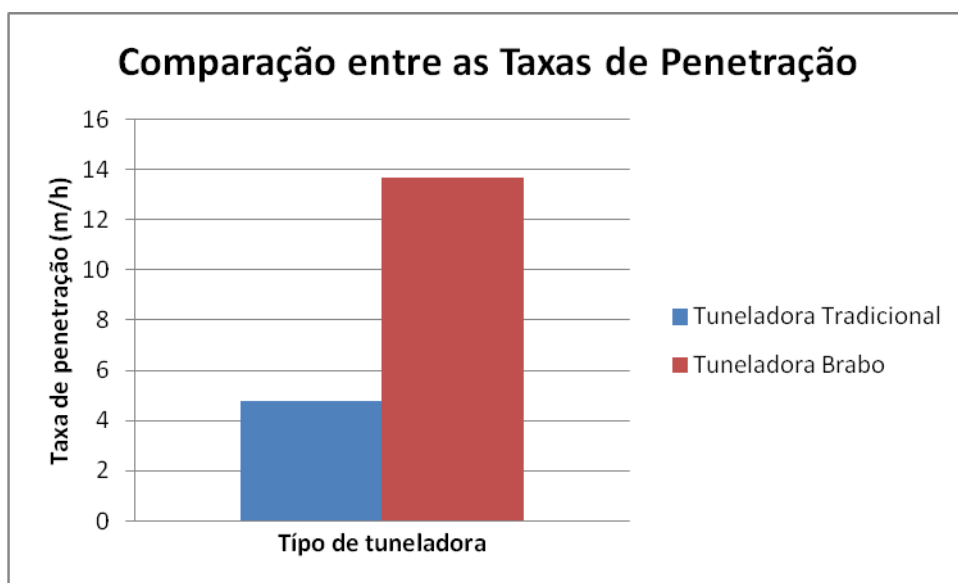
Tabela 3.12 – Parâmetros utilizados no cálculo da Taxa de Penetração da tuneladora BraBo.

Diâmetro externo (m)	4,29	Taxa de remoção (m³/h) para 1 bocal	4,39
Diâmetro interno (m)	3,89		
Área \emptyset ext. (m²)	14,45	Nº de bocais (un.)	8,00
Área \emptyset int. (m²)	11,88	Vol. Tot. escavado (m³/h)	35,10
Área anular (m²)	2,57	Taxa de penetração (m/h)	13,66

Fonte: Autor.

A comparação entre os dois valores de taxa de penetração é apresentada no gráfico da Figura 3.10. A taxa de penetração encontrada para a tuneladora BraBo foi aproximadamente 3 vezes maior que a da tuneladora tradicional. Este resultado está dentro do esperado, já que a tecnologia BraBo foi pensada justamente para trabalhar em rochas e para aumentar o desempenho das máquinas tuneladoras nesta situação.

Figura 3.10 – Comparação entre as taxas de penetração para a TBM tradicional e para a TBM BraBo.

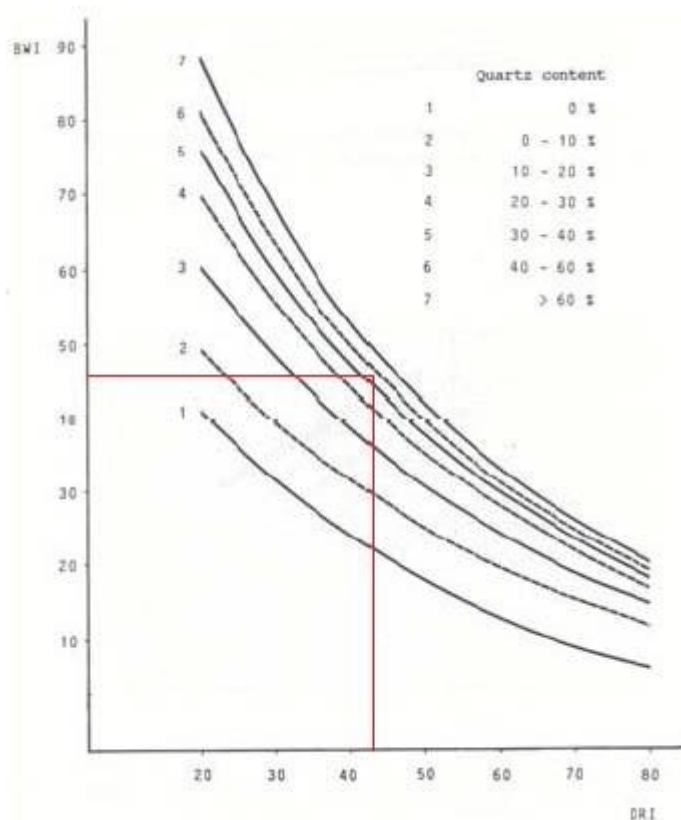


Fonte: Autor.

3.2.3. Durabilidade dos sistemas de corte

Para a TBM tradicional, a durabilidade do disco de corte, em horas escavadas, é uma função do diâmetro do próprio disco e do Índice de Durabilidade CLI. Não tendo conhecimento deste último, o mesmo foi estimado através de ábacos da literatura NTNU. Partindo do Índice de Perfuração DRI e conhecendo o conteúdo de quartzo (40-45%), foi possível obter o Índice de Desgaste BWI próximo a 46, como mostrado no ábaco da Figura 3.11.

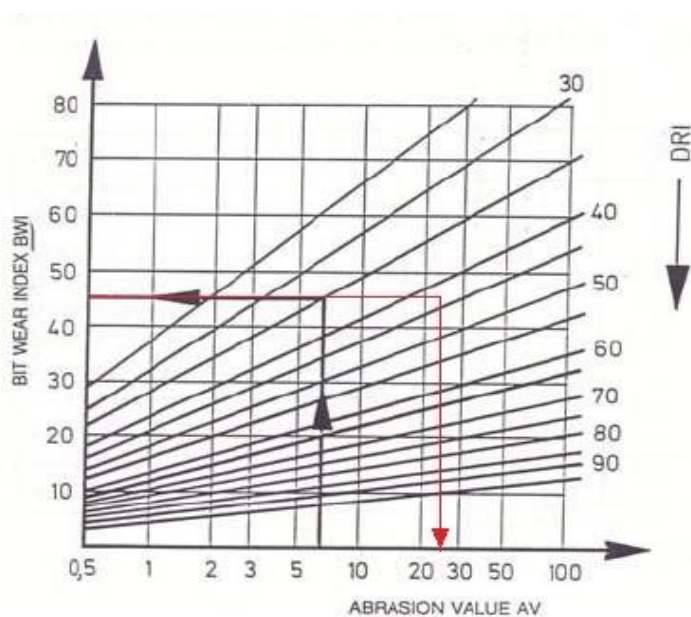
Figura 3.11 – Relação entre o índice DRI, conteúdo de quartzo e índice BWI.



Fonte: Bruland, 2000.

Uma vez conhecido o valor de BWI, juntamente com o valor de DRI é possível obter o valor de abrasão AV do gráfico apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Relação entre o índice DRI, índice BWI e o valor de abrasão AV.



Fonte: Bruland, 2000.

Com o qual se obtém um valor de AV próximo a 25. O valor do Índice de Abrasão medido no disco de corte AVS é correlacionável de maneira direta com o valor de AV, em uma relação de 1:2 em se tratando de rocha micaxisto (litologia prevalente do traçado). Tal correlação é expressa no gráfico da Figura 3.13.

Figura 3.13 – Relação entre o índice AV, tipo de rocha e o valor de abrasão do disco de corte AVS.



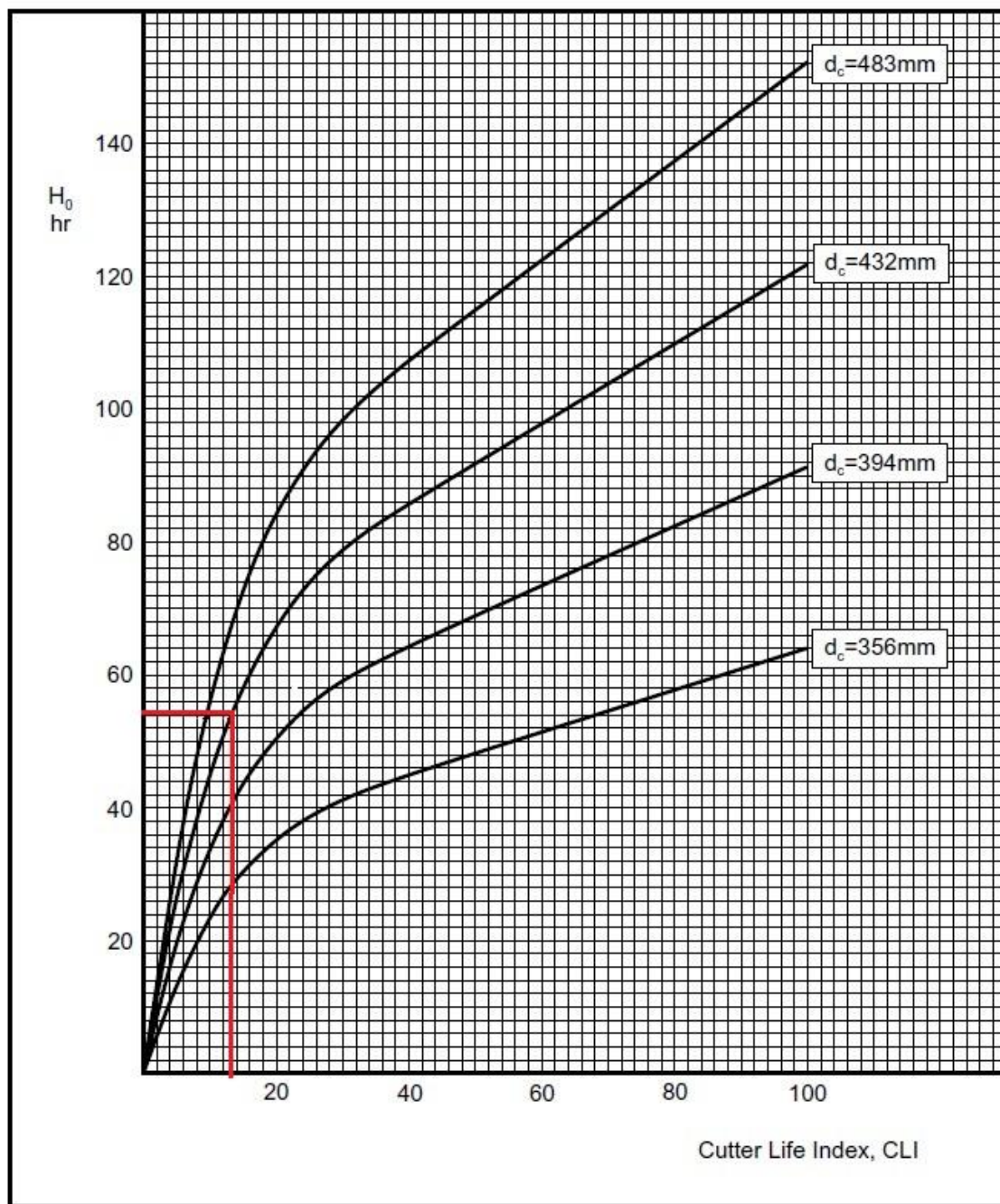
Fonte: Bruland, 2000.

Portanto, conhecidos os valores de AV (14) e SJ (13,8), é possível obter o Índice de Durabilidade CLI através da Equação 6.

$$CLI = 13.84 \cdot \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (6)$$

O resultado encontrado para o índice CLI foi 13,76 e, a partir deste, é possível estimar a duração, em horas de escavação, do disco de corte através do gráfico da Figura 3.14.

Figura 3.14 – Durabilidade dos discos em horas.



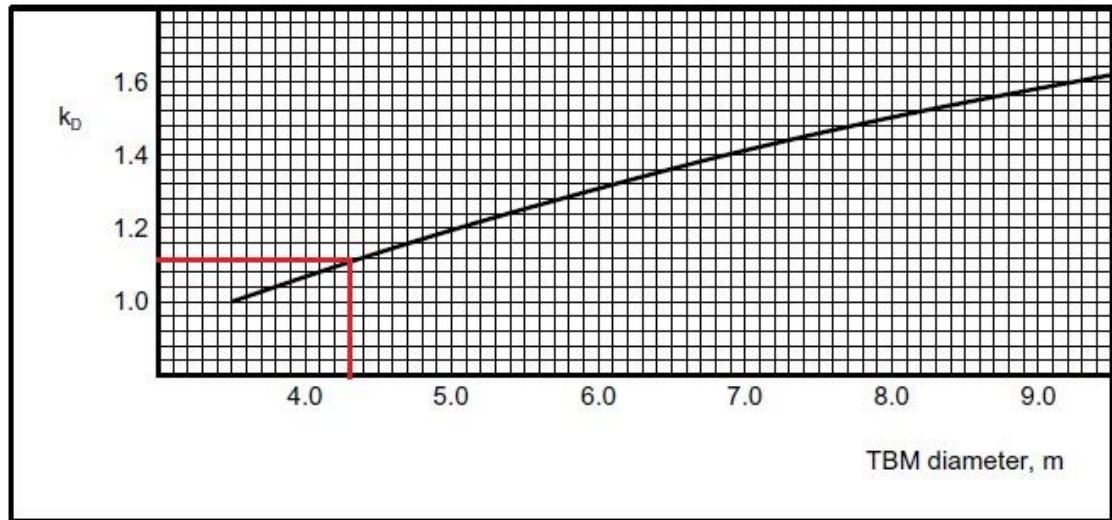
Fonte: Bruland, 2000.

A durabilidade encontrada para o disco foi de 54 horas. Porém, como explicado no item 2.4.1.2, é necessário a aplicação de alguns fatores de correção ao valor encontrado para a durabilidade do disco, calculados a seguir.

O primeiro fator de correção diz respeito ao diâmetro da TBM e é necessário, pois os discos centrais e periféricos apresentam uma pequena diferença no tempo de vida com relação àqueles posicionados na face. Com o aumento do diâmetro da TBM, a razão entre os discos centrais e periféricos e

os discos da face diminui, aumentando assim a média de vida dos discos. O fator de correção para o diâmetro da TBM, encontrado através da Figura 3.15, foi de 1,14.

Figura 3.15 – Fator de correção para o diâmetro da TBM.



Fonte: Bruland, 2000.

A durabilidade dos discos de corte é inversamente proporcional à velocidade da cabeça de corte, conforme a suposição de que o tempo de desgaste é proporcional à velocidade de rolamento dos discos. O fator de correção para variações da velocidade da cabeça de corte é mostrado na Equação 7.

$$k_{rpm} = \frac{50 / d_{tbn}}{RPM} \quad (7)$$

onde, d_{tbn} = diâmetro da TBM

rpm = Velocidade da cabeça de corte

Entrando com os dados necessários, $d_{tbn} = 4,291$ m e rpm = 10 encontrou-se $k_{rpm} = 1,16$.

O terceiro fator de correção é necessário quando o número de discos na cabeça de corte difere do indicado pelo modelo, já que isto provoca uma mudança na média de durabilidade dos discos. A correção é feita através do fator encontrado pela Equação 8. Tal ajuste não será necessário visto que o

número de discos utilizado no presente estudo é o mesmo que o indicado pelo modelo NTNU.

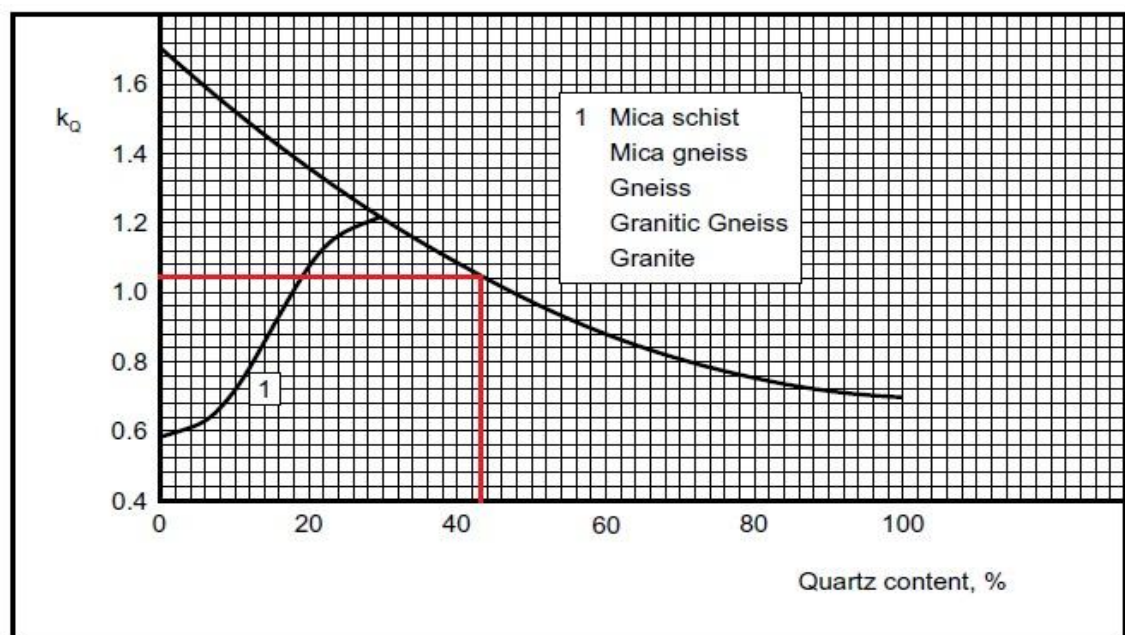
$$k_N = \frac{N_{tbn}}{N_0} \quad (8)$$

onde, N_{tbn} = número de discos de corte presentes na TBM

N_0 = número de discos de corte indicado pelo modelo NTNU

O quarto fator de correção apresentado pelo NTNU é baseado no fato que a durabilidade dos discos de corte varia de acordo com o conteúdo de quartzo e outros minerais duros e abrasivos. A Figura 3.16 mostra o fator de correção levando em consideração apenas o conteúdo de quartzo.

Figura 3.16– Fator de correção para o conteúdo de quartzo.



Fonte: Bruland, 2000.

Levando em consideração a rocha presente no maciço a ser escavado, micaxisto, e o conteúdo médio de quartzo, 40-45%, encontrou-se o fator de correção igual a $k_Q = 1,12$.

Na Tabela 3.13 é apresentado um resumo dos fatores de correção calculados.

Tabela 3.13 - Resultados da aplicação do jato de água no maciço rochoso.

Parâmetros da Tuneladora	Fator de correção
Número de discos de corte na cabeça de corte	$K_N = 1,00$
Diâmetro do disco de corte	$K_Q = 1,12$
Diâmetro da tuneladora	$K_D = 1,14$
Rotações por minuto da cabeça de corte	$K_{rpm} = 1,16$

Fonte: Autor.

A durabilidade dos discos de corte corrigida é dada através das Equações 9, 10 e 11, apresentadas abaixo.

$$H_h = (H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{rpm} \cdot k_N) / N_{tbm} \quad (9)$$

$$H_m = H_h \cdot I_n \quad (10)$$

$$H_f = H_h \cdot I_n \cdot \pi \cdot d_{tbm}^2 / 4 \quad (11)$$

onde, H_0 = durabilidade básica do disco de corte

H_h = durabilidade média do disco de corte em horas

H_m = durabilidade média do disco de corte em metros

H_f = durabilidade média do disco de corte em metros cúbicos

I_n = taxa de penetração

d_{tbm} = diâmetro da TBM

Utilizando os fatores de correção calculados anteriormente e, resumidos na Tabela 3.13, encontrou-se as durabilidades apresentadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Valor de durabilidade dos discos de corte.

Durabilidade dos discos	
H_0 (h)	54,00
H_h (h)	2,50
H_m (m)	12,00
H_f (m³)	173,49

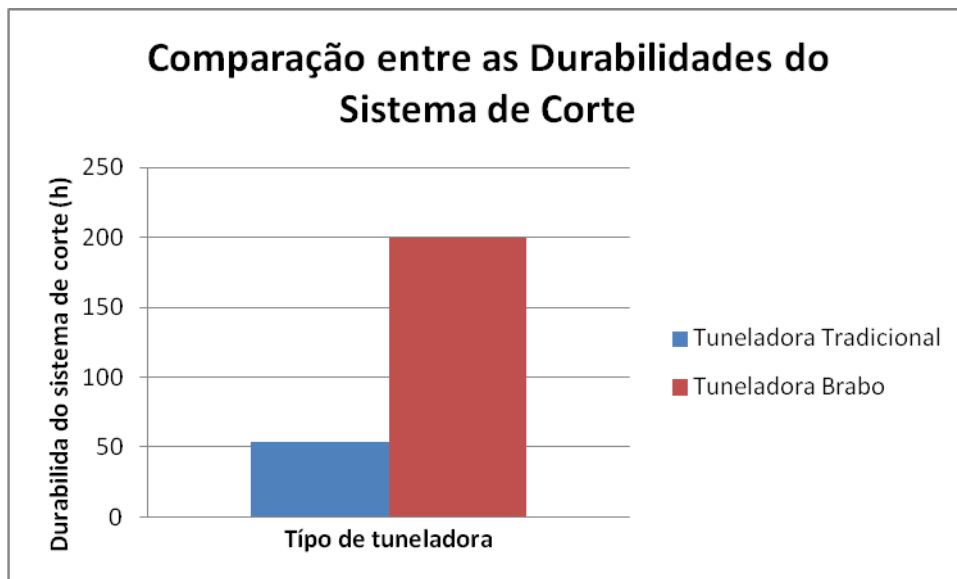
Fonte: Autor.

O valor de durabilidade H_0 expressa a duração de vida de um anel de corte em uma posição média na TBM ($\approx 0.59 \cdot r_{\text{tbm}}$) em horas/máquina. Já H_h , H_m e H_f expressam a média de durabilidade do disco para a cabeça de corte ou para o túnel. Por exemplo, para $H_m = 10$ metros, significa que para cada 10 metros de túnel, a média total de desgaste de todos os discos da cabeça de corte corresponde a um disco completo. Isso também significa que, em média, a cada 10 metros de escavação de túnel um disco precisa ser trocado.

Com relação ao sistema de corte por jatos de água, a sua durabilidade é fortemente dependente da água utilizada, definida pelo tempo de vida dos bocais do jato de água. Segundo Momber (2005), uma boa estimativa de durabilidade utilizando água purificada é de 200 horas para cada bocal.

No gráfico apresentado na Figura 3.17 é possível visualizar a diferença de durabilidade entre os discos de corte e os bocais do jato de água. Essa dissemelhança já era esperada já que um dos grandes problemas da TBM tradicional, e que motivou a inovação com jatos de água, é o alto desgaste dos discos de corte.

Figura 3.17 – Comparação entre o valor de durabilidade dos sistemas de corte.



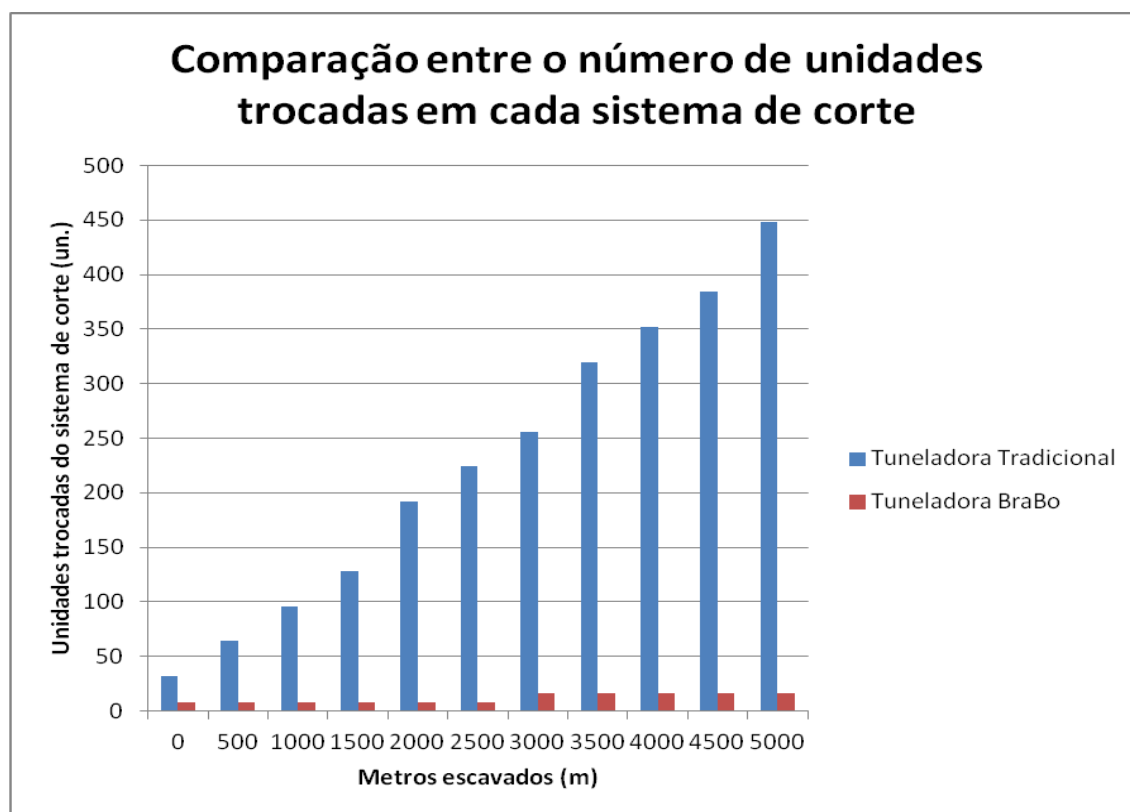
Fonte: Autor.

Sendo a durabilidade de cada disco igual a 2,5 horas e a taxa de penetração igual a 4,8 m/h, é possível definir o número total de discos a serem empregados na escavação do túnel de 5000m. Levando-se em consideração apenas as horas em que a máquina estaria trabalhando, o túnel demoraria 1042 horas para ser finalizado, o que totalizaria 417 discos repostos.

Levando em consideração que a cabeça de corte possui 32 discos, deverão ser feitas 13 substituições totais dos discos. Isto significa que a cada 384 metros o trabalho da tuneladora deve ser interrompido para tais substituições.

Já para o sistema de corte com jato de água, considerando a taxa de penetração igual a 13,66 m/h, a execução do túnel seria feita em 366 horas e, portanto, seria necessário uma substituição do sistema com 8 bocais, totalizando 16 bocais em toda a escavação. A Figura 3.18 apresenta graficamente o número de unidades trocadas em cada sistema de corte, discos de corte na TBM tradicional e bocais de jato de água na TBM BraBo.

Figura 3.18 – Comparação entre o número de unidades trocadas em cada sistema de corte.



Fonte: Autor.

3.2.4. Cálculo da taxa de avanço

A taxa de avanço é dada em metros por semana como uma média para este período e depende da taxa de penetração, da utilização da máquina e do número de horas trabalhadas no período.

O modelo NTNU é em grande parte baseado em dados de experiência de um sistema de turnos que totaliza 100 horas de trabalho por semana. Com

relação à tuneladora BraBo, também considerou-se uma jornada semanal de 100 horas.

A utilização da máquina inclui as possibilidades de substituições dos dispositivos do sistema de corte (discos e bocais), de manutenção e reparação da TBM e de seu backup, etc. No presente estudo a utilização da máquina foi estimada levando-se em consideração apenas as substituições feitas no sistema de corte, já que o objetivo do trabalho não inclui fazer uma análise do sistema de suporte. Tendo em vista o número de substituições que deverão ser feitas na tuneladora tradicional, estimou-se um coeficiente de utilização de 0,5. Para a tuneladora BraBo foi estimado o valor de 0,45 pois apesar desta máquina realizar apenas uma parada para substituição do sistema de corte, deve-se levar em consideração que a mesma ainda se encontra em fase de projeto e, portanto, possui um nível de robustez menor. O modelo NTNU é baseado em uma larga experiência de campo e, sendo assim, já possui as condicionantes do sistema de construção muito bem mapeados, o que ainda não ocorre para a tuneladora BraBo.

A taxa de avanço pode ser calculada multiplicando-se a taxa de penetração pelo número de horas e pelo coeficiente de produtividade, os valores encontrados são apresentados na Tabela 3.15.

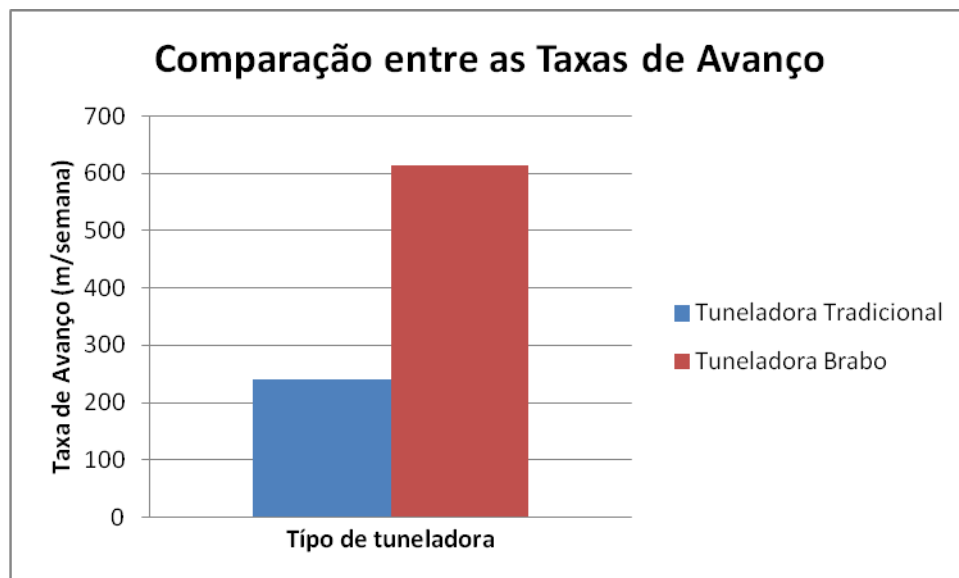
Tabela 3.15 – Valor da taxa de avanço.

Tuneladora	Tradicional	BraBo
Taxa de penetração (m/h)	4,80	13,66
Horas trabalhadas/semana	100,00	100,00
Coeficiente de produtividade	0,50	0,45
Taxa de Avanço (m/semana)	240,00	614,80

Fonte: Autor.

A Figura 3.19 mostra uma comparação entre a taxa de avanço para os dois tipos de tuneladoras analisadas. A TBM BraBo é cerca de 2,5 vezes mais produtiva do que a TBM tradicional. Esta diferença entre as taxas de avanço já era esperada, já que a tuneladora BraBo foi proposta justamente para aumentar a produtividade das TBMs tradicionais, principalmente no caso de escavação em rocha que é o mais problemático quando se analisa apenas o sistema de corte.

Figura 3.19 – Comparação entre as taxas de avanço em cada sistema de corte.



Fonte: Autor.

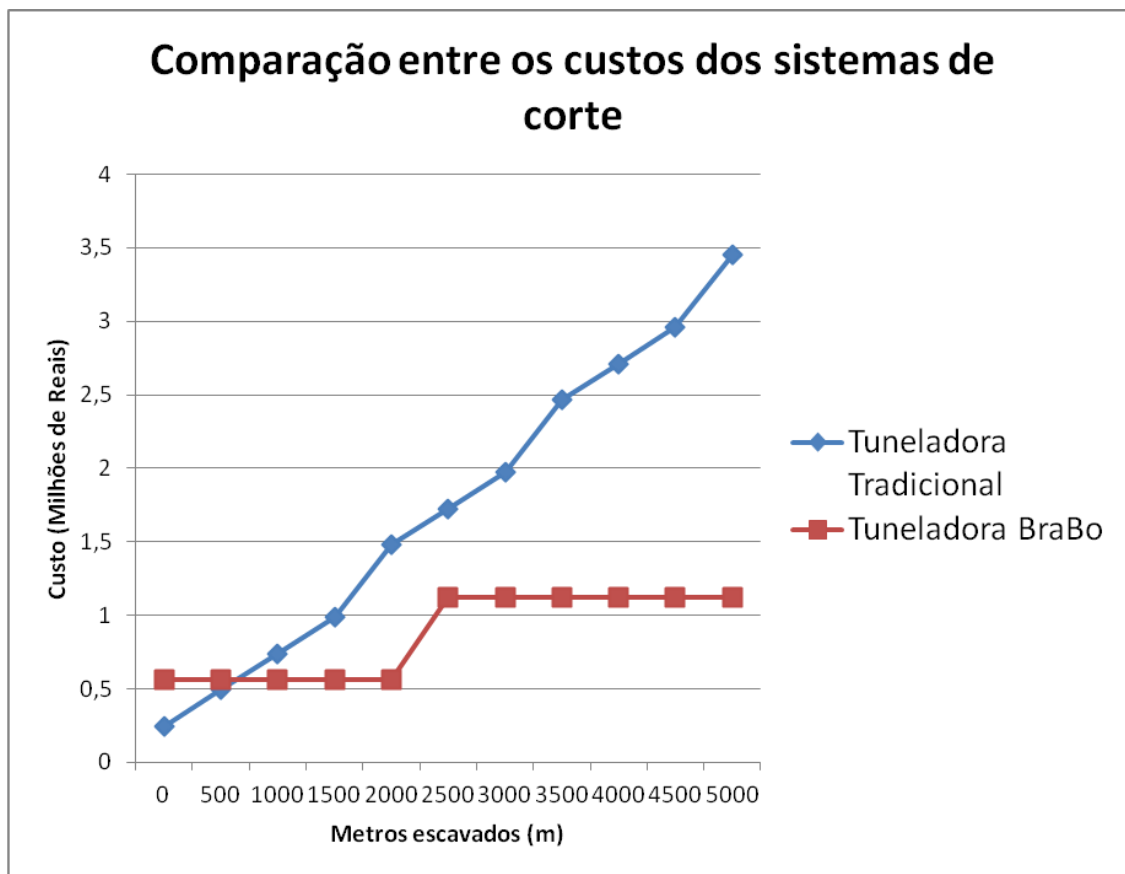
3.2.5. Custos de escavação

Os custos de escavação calculados no presente estudo foram baseados apenas no valor dos elementos de corte utilizados em cada sistema. Uma análise do modelo de custo de todo o processo de escavação demandaria estimativas detalhadas de todos os gastos incluídos no processo, o que não é o escopo do presente estudo.

Segundo orçamento feito pela empresa KMT para a tuneladora BraBo, um conjunto com 4 bocais custaria em torno de 280.000 reais, totalizando 1.120.000 reais para os 16 bocais utilizados na execução do túnel. Para os discos de corte adotou-se o valor de 7.700 reais por peça, baseado em pesquisa em sites de compra, totalizando um valor de 3.449.600 reais.

O gráfico da Figura 3.20 permite visualizar o custo de cada sistema de escavação na medida em que o túnel é executado. Percebe-se que o método de escavação com a utilização de discos de corte é vantajoso apenas nos primeiros 500 metros, enquanto após esse comprimento, o método de escavação por hidrodemolição se torna muito mais rentável. O custo final da obra, considerando-se apenas o sistema de corte, é 3 vezes maior utilizando o sistema tradicional.

Figura 3.20 – Comparação entre os custos dos sistemas de corte analisados.



Fonte: Autor.

4. Conclusões

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de realizar uma análise de produtividade de uma máquina tuneladora com sistema de corte tradicional e outra com sistema de corte inovador. Os estudos foram feitos pra um maciço rochoso hipotético constituído de rocha dura e com métodos teóricos disponíveis na literatura. Os objetivos específicos foram atendidos: apresentar as características principais do funcionamento do sistema de corte por discos de corte e por hidrodemolição através de jato de água; calcular parâmetros que quantifiquem o desempenho de cada máquina: taxa de penetração, taxa de avanço e durabilidade de cada sistema de corte; associar os parâmetros acima citados ao custo de cada sistema e assim obter o custo/benefício de cada máquina e, fornecer uma análise sobre a nova tecnologia proposta pela empresa BraBo.

O método NTNU se mostrou bastante adequado e completo para o propósito de se obter índices indicativos da produtividade de tuneladoras com sistema de corte tradicional. Ele abrange uma ampla gama de parâmetros tanto relacionados à máquina quanto ao ambiente de trabalho que permitem obter-se uma estimativa de desempenho próxima à da realidade. Com relação ao método utilizado para o cálculo do desempenho da tuneladora BraBo, apesar das diversas adaptações feitas, serviu ao propósito inicial que era o de encontrar os parâmetros de comparação de maneira simplificada.

Com relação aos sistemas de corte analisados, a escavação através de hidrodemolição com jato de água se mostrou promissora. A tecnologia apresenta uma alta taxa de remoção volumétrica associada a uma elevada durabilidade dos componentes, o que resulta em um menor custo total do sistema. A utilização desta tecnologia em máquinas tuneladoras tornaria o método mecanizado mais acessível, viabilizando a construção de mais túneis através desta técnica e acelerando o tempo de execução destas obras.

Analisando os parâmetros de desempenho calculados, tanto os técnicos como os econômicos, a TBM BraBo se mostrou cerca de 3 vezes superior em todos. Portanto, pode concluir-se que, no caso de escavação de túneis com

método mecanizado a TBM BraBo é sempre mais vantajosa do que a TBM tradicional.

4.1 Limitações

As maiores limitações encontradas neste trabalho são relacionadas ao fato de que ainda não foi realizada nenhuma obra com a tecnologia BraBo, o que dificulta a validação dos resultados obtidos. Também é importante salientar que atualmente não existe uma metodologia de cálculo específica para o desempenho da hidrodemolição com jatos de água na escavação de túneis. Por isso, os parâmetros de desempenho da tuneladora BraBo foram encontrados com base em estudos feitos sobre a hidrodemolição para outras situações.

4.2. Sugestões para trabalhos futuros

A inovação apresentada pela tuneladora BraBo de utilizar hidrodemolição com jatos de água para a escavação de túneis se mostrou promissora. Entretanto, a tecnologia ainda inova em outros sistemas da máquina. Uma das sugestões propostas para a continuação deste trabalho seria a de verificar se as outras inovações apresentadas para a nova tuneladora, em especial a extrusão de concreto, não seriam gargalos que reduziram os parâmetros de desempenho da máquina.

Uma segunda sugestão seria a de realizar uma análise que levasse em consideração não somente os custos advindos do sistema de corte, mas também os custos energéticos, de mão de obra e sistemas de suporte, o que poderia mudar o panorama da comparação.

Referências

ALBER, M.; YARALI, O.; DAHL, F.; BRULAND, A.; KÄSLING H.; MICHALAKOPOULOS T. N.; CARDU, M.; HAGAN, P.; AYDIN. H.; ÖZARSLAN, A. (2014). **ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test**. In: Rock Mech. Rock Eng. 47. p. 261–266.

BRULAND, A. (2000). **Hard Rock Tunnel Boring**. Universidade de Ciencia e Tecnologia da Noruega. Faculdade de Engenharia de Ciencia e Tecnologia. Tese de doutorado.

CARVALHO, N. (2006). **Túneis Rodoviários**. In: T.B. Celestino, A. Koshima, R.C.A. Telles & A.P. Assis (Eds.). Túneis do Brasil. Comitê Brasileiro de Túneis- ABMS, São Paulo. p. 28-34.

CASTRO, A. O. (2013). **Métodos para Seleção de Tuneladoras e Análise Numérica de Diferentes Alinhamentos de Túneis Sujeitos a Altas Pressões Hidráulicas**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. p. 363.

CONCILIA, M. (2012). **Frese Meccaniche per lo Scavo a Piena Sezione di Gallerie in Ammassi Rocciosi**. Apostila do curso de Construção de Túneis – Politécnico di Torino.

DAHL, F; GROV, E; BREIVIK, T. (2006). **Development of a new direct test method for estimating cutter life, based on the Sievers' J miniature drill test**. . In: Tunnel and Underground Space Tecnology 22. p. 106-116.

DAHL, F; BRULAND, A; JAKOBSEN P. D. (2011). **Classification of properties influencing the drillabilty of the rocks, based on NTNU/SINTEF test method**. In: Tunnel and Underground Space Tecnology 28. p. 150-158.

HENRIQUES,T. V. L. D. (2009). **Corte de rochas com jactos de água de**

alta pressão. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Dissertação de Mestrado. p. 93.

HERRENKNECHT TUNNELLING SYSTEMS. Disponível em <<http://www.herrenknecht.cn/process-technology/machinetechnology/grippertbm.>>. Acesso em 21 jun. 2014.

HERRENKNECHT TUNNELLING SYSTEMS. Disponível em <<http://www.herrenknecht.cn/process-technology/machine-technology/singleshield-tbm.html>>. Acesso em 21 jun. 2014.

HERRENKNECHT TUNNELLING SYSTEMS. Disponível em <<http://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/tunnelling-pipelines/epb-schild.html>>. Acesso em 21 jun. 2014.

HERRENKNECHT TUNNELLING SYSTEMS. Disponível em <<http://www.herrenknecht.cn/process-technology/machine-technology/epbshield.html>>. Acesso em 21 jun. 2014.

MOMBER, A. W. (2005). **Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete Structures.** Inglaterra: Elsevier. p. 41.

NORONHA, M.; FARIA, P. (2010). **Inovação tecnológica no setor de máquinas tuneladoras e a implantação de uma indústria promissora no Sul do Brasil.** GEOSUL 2010.

NORONHA, M.; GOMES, B.; SANTOS, R.; TAQUEDA, D. (2012). **Construction of Non-Circular Tunnels with Waterjet Cutting. International No-Dig.**

NORONHA, M.; FARIA, P.; PIERRI, L.; SANTOS, R.; PACHECO, L. (2013). **Conception and Design of a Rock TBM.** BraBo Tecnologia Inc., Florianópolis, Brazil. 10 p.

PATRIARCHI, V. (2011). **Relazione tra Prestazioni di TBM EPB di Grande Diametro in Ammassi Complessi e Parametri Strutturali e Meccanici – Criticità e Approcci Risolutivi.** Bologna. p. 7

SAMPAIO, M. A. B. (2009). **Mecânica do contato com o método dos elementos de contorno para modelagem de máquinas tuneladoras.** Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Dissertação de Mestrado.

SILVA, P.C. T. (2006). **Túneis antigos do Brasil.** In: T.B. Celestino, A. Koshima, R.C.A. Telles & A.P. Assis (Eds.). Túneis do Brasil. Comitê Brasileiro de Túneis- ABMS, São Paulo. p. 21-25

YARALI, O. KAHRAMAN, S. (2011). **The drillability assesment of rocks using the different brittleness values.** In: Tunnel and Underground Space Technology 26. p. 406-414.

ZHAO, J. **The Challenge of TBM Excavation in Rock.** In: Tunnels and Tunnelling Internacional 9 (2006). p. 27-29.